



TITLE:

信号機周辺における道路騒音予測
に関する基礎的研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

加藤, 裕一

CITATION:

加藤, 裕一. 信号機周辺における道路騒音予測に関する基礎的研究. 京都大学, 1993, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1993-09-24

URL:

<https://doi.org/10.11501/3070432>

RIGHT:

信号機周辺における道路騒音予測 に関する基礎的研究

1993年 5月

加 藤 裕 一

信号機周辺における道路騒音予測 に関する基礎的研究

1993年 5月

加 藤 裕 一

信号機周辺における道路騒音予測 に関する基礎的研究

目 次

緒 論	1
第1章 道路騒音の予測に関する従来の研究と考察	5
1.1 従来の道路騒音予測手法	6
1.1.1 緒 言	6
1.1.2 定常交通流での騒音予測モデル	6
1.1.2-1 等間隔モデル	7
1.1.2-2 指数分布モデル	9
1.1.2-3 その他のモデル	17
1.1.3 特殊箇所での騒音予測モデル	17
1.1.3-1 計算機シミュレーションによる予測手法の基本的な考え方	18
1.1.3-2 市街地交差点周辺での例	20
1.1.4 結 言	24
この節の引用文献	25
1.2 従来の予測手法に対する考察と検討	29
第2章 信号機が道路騒音の変動形態に及ぼす影響の実態調査	31

2.1	信号機の点滅が道路騒音に及ぼす影響の実態調査	33
2.1.1	緒言	33
2.1.2	市街地交差点内における道路騒音の実測調査	33
2.1.3	幹線道路沿いの信号機間における道路騒音の実測調査	35
2.1.4	信号機の点滅影響の空間的変容に関する実測調査	37
2.1.5	実測調査のまとめ	40
2.1.6	結言	40
	この節の引用文献	40
第3章	信号機周辺における道路交通騒音のレベル分布予測	42
3.1	レベル平均値の周期的変動に着目した騒音レベル分布予測	43
3.1.1	緒言	43
3.1.2	騒音レベル変動のモデル化と確率密度関数表現（表現法1）	43
3.1.3	実測データによる実験的確認	45
3.1.4	理論的推定手法の実用化に関する試み	47
3.1.5	結言	51
	この節の引用文献	52
3.2	高次レベル統計量の周期的変動特性まで考慮した騒音レベル分布予測	53
3.2.1	緒言	53
3.2.2	周期的非定常レベル変動に対する一般的確率分布表現（表現法2）	53
3.2.3	実測データによる実験的確認	57
3.2.4	変動パターンの単純化に基づく推定手法の実用化	60
3.2.5	結言	61
	この節の引用文献	62
第4章	信号機周辺の交通流観測に基づく道路騒音レベル分布の予測	63

4.1 平均走行車両台数の周期的変動に着目した分布予測	64
4.1.1 緒言	64
4.1.2 騒音レベル統計量と平均走行車両台数との関連性	64
4.1.3 実測データによる実験的確認	69
4.1.4 変動パターンの近似化に基づく推定手法の実用化	71
4.1.5 結言	76
この節の引用文献	77
4.2 市街地交差点内における騒音レベル分布予測	78
4.2.1 緒言	78
4.2.2 騒音レベルと交通流状態の測定	78
4.2.3 観測点に及ぼす支配的区間の推定とシミュレーション実験	79
4.2.3-1 考察対象領域の設定	81
4.2.3-2 デジタルシミュレーションモデルの設定	81
4.2.3-3 考察対象領域の推定	83
4.2.4 騒音レベル分布の数値的評価結果	87
4.2.5 結言	94
この節の引用文献	94
第5章 交通流情報に基づく周期的非定常道路騒音の予測	96
5.1 流体力学的交通流理論に基づく騒音レベル分布の予測	98
5.1.1 緒言	98
5.1.2 道路状況と交通流に対するモデルの設定	99
5.1.3 交通流の簡易的解析手順の設立	101
5.1.4 計算手順の実道路への適用	104
5.1.5 騒音レベル分布の推定結果	110
5.1.6 結言	113
この節の引用文献	119
付 録	119

5.2	交通量時間率に基づく分布予測	121
5.2.1	緒言	121
5.2.2	交通量時間率に基づく騒音レベル分布表現	122
5.2.3	交通流状態推定法に基づく騒音シミュレーション実験	123
5.2.4	実測データによる実験的確認	126
5.2.5	結言	129
	この節の引用文献	129
第6章	信号機周辺における道路騒音の簡易予測	130
6.1	簡易化交通流モデルに基づく騒音予測と実験的検討	131
6.1.1	緒言	131
6.1.2	交通流及び騒音発生モデルの設定と理論的考察	132
6.1.2-1	音の強さの統計量に対する考察	136
6.1.2-2	音の強さの統計量と流量との回帰的關係に対する考察	137
6.1.3	騒音指標 L_{50} , L_{eq} の陽表示	139
6.1.4	簡易予測手法の実験的検討	141
6.1.4-1	簡易評価法の予測手順	142
6.1.4-2	実道路への適用例	143
6.1.4-3	実道路への適用結果に対する検討	161
6.1.5	結言	163
	この節の引用文献	163
総括		165
謝辞		169

関連分野における発表論文	----- 170
--------------	-----------

緒 論

昭和30年代半ばあたりから、日本における自動車保有台数が急激に増加したのに伴い、都市域やその周辺、幹線道路及び高速道路周辺における自動車騒音の問題が顕在化しはじめた。時期を同じくして、大気汚染、水質汚濁などの環境汚染が大きな社会問題になるに至り、ついに昭和42年には環境保全の為に公害として、大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、地盤沈下及び悪臭の7項目が定義され、公害基本法が公布された。特に騒音に関しては、昭和46年に工場騒音といった一般騒音も含めて道路騒音に関する環境基準が制定されたことは周知の事実である。

このような社会状況から、これまでに道路騒音に関する多くの調査結果が報告されているのみならず、騒音の評価指標に関する研究やその推定・予測手法等が提案され、多くの研究成果が蓄積されている。特に、高速道路や自動車専用道路における騒音問題は重要でありこれまでに多くの報告がなされている。このような定常に近い交通流状態での騒音問題では、等間隔モデルや指数分布モデルはそのモデル的簡易さと大略的に現象を捉えることが可能であることが経験的にも知られていることから、騒音予測方式としての基幹的位置を既に築き、多くの騒音評価・対策問題に用いられている。

一方、上記定常交通流状況とは対称的に、例えば市街地交差点等で観測されるように信号機によって車両が制御され、停車・発進加速を繰り返して非定常な交通流から発生する騒音問題も存在する。このような道路状況での騒音予測に関する研究は、解析的に多くの困難な問題があるためかあまり報告されていないようである。

本論文は、以上のような背景から、市街地交差点周辺や幹線道路に設置されている信号機の点滅によって生じる非定常交通流とその発生騒音を実測調査し、得られた知見に基づき騒音レベル分布の予測手法について考察を行ったものである。

以下、本論文に関連したこれまでの研究成果を述べるとともに、本論文での考察内容を各章に分けて概説する。

一般に設定された道路状況での騒音の予測モデル、即ち騒音レベル分布や L_{eq} , L_{50} といった騒音指標を予測するモデルを構築するためには、次なる三つの構成要素、1) 個々の

車両（騒音源）が発生する騒音の特性、2）それらの騒音源から観測点への伝搬特性、及び
3）車両が集団として走行する性状、を明かにする必要がある。

第1章では、本研究を考究する第一歩として、従来提案された道路騒音予測モデルを特に3）の構成要素に着目して整理し、概括した。具体的には、定常交通流に関する予測モデルと特殊箇所での予測モデルに大別して、それぞれの代表的モデルの大略を記した。特に後者のモデルとして、本研究が考察対象としている信号機の点滅に影響を受けた非定常な交通流から発生する騒音の予測方式に関する一研究例をまとめた。従来、このような道路状況に対する理論的考察はほとんどなく、いくつかの実測結果や計算機シミュレーションによる予測方式が報告されているのみである。

最後に、このような整理を行った上でこれまでの研究成果を採用し、拡張・発展させて本研究が考察対象としている道路状況での騒音予測方式を理論的に考察するにはかなりの困難が伴うことを考察し、新たな視点からのアプローチによる方法論を設立せねばならないことを明かにした。

一般に、物理的現象を解明し工学的目標を達成するためには、まず対象とする現象をよく観測・観察した上でその現象を引き起こす基幹的原理・構造を暴き出し目的に合ったモデル化を行い定量化をする必要がある。この後、対象とする現象を有効利用するとか、制御をするとかいった工学的目標を達成する道を開くことが可能となる。

第2章では、第1章での考察結果をふまえて、信号機の点滅により引き起こされる非定常交通流とその発生騒音を、次に示す代表的な道路状況で実測調査を行い解析の指針を得る作業を行った（即ち、1）市街地交差点での調査、2）幹線道路沿いの交差点間での調査、3）自動車専用道路流入点の交差点周辺での調査（信号機近傍から下流に行くに従い、どのようにその騒音レベル変動形態を変えて行くのかに関する調査）である。この結果、考察対象は共通に信号機が周期的に点滅することによって引き起こされる繰り返し現象であるとの知見を得た。特に、不規則に変動している騒音レベルに関してその平均値の変動には、信号機の影響を明確に示すそれぞれの道路状況に固有な特色ある周期的変動パターンが存在することを見出し、周期的繰り返し現象であることを確認した。

第3章では、第2章での実測結果から得られた知見、即ち騒音レベルの統計量の変化に周期性が存在することを考察対象が示す基幹的現象として捉え、このような騒音レベル変

動が長時間で示す騒音レベル分布の予測手法について考察した。第一近似的には、レベル平均のみが周期的に変動し、2 次以上の高次統計量は一定値を示すモデルとして表現し、長時間スケールでの騒音レベル分布表現を与え実験的に確認した。さらに信号一周期当たりの実測レベルデータが入手出来れば、近似化操作によりレベル分布が大略的に予測可能であることを示した。次いで、上記考察を更に一般化し、高次レベル統計量の変動パターンまで考慮した騒音レベル分布表現を与えた。特に、分散の変動パターンまで考慮したモデルを実測騒音データに適用して、レベル分布の収束性を改善出来ることを示した。

第4 章では、第3 章で考察した騒音レベル変動現象をその発生源である交通流に根ざして考察した。具体的には、まず不規則に変動する交通流状況を記述するための基本量の一つである平均的な走行車両台数の信号一周期での変動パターンが、第2 章で示した平均レベルのそれと相似的な変動パターンを示すことを実測データより見いだした。従って、走行車両の平均台数と各騒音エネルギー統計量との間によく知られた等間隔モデル、指数分布モデルに根ざした回帰モデルを設定し、走行車両の平均台数の変動パターンからレベル統計量の変動パターンを推定することが可能であることを示した。次いで、第3 章で考察したレベル分布理論に帰着させることにより、走行車両の平均台数の変動パターンから長時間スケールでの騒音レベル分布予測が可能となることを示し、実験的にも確認した。特に、交差点内での騒音問題に関しては、走行車両の平均台数の変動パターン、車種混入率、走行速度が分かれば計算機シミュレーションによってもレベル分布予測が可能であることを示した。

第2 章から第4 章までの考察をまとめると、第2 章で行った実測調査から考察対象は周期的繰り返し現象であるとの知見に基づき、第3 章では騒音レベル統計量（平均、分散等）の変動パターン、第4 章では騒音発生源である平均的な走行車両台数の変動パターン、を基幹とする騒音レベル分布予測手法を考察し実験的検討を行ってきた。しかしながら、ここまでの考察はそれら変動パターンが入手可能となった後での考察に留まっていた。即ち、実験的検討では観測された変動パターンを用いていた。例えば、新設道路で生じる騒音問題では道路状況（道路幅、車線数、信号周期、観測点の位置等）を設定した後、交通量等を入力情報として与えた場合での騒音レベル分布や騒音指標を評価・予測するといった問題がしばしば生ずる。このような工学的目的を果たすためには、第3 章、第4 章で着目した各変動パターンを入力情報から理論的考察に基づき推定・予測する必要がある。

そこで、第5章では単位時間当たりでの交通量から騒音発生源である交通流の状態推定を理論的に行い、騒音レベル分布予測問題へ適用することを考察した。具体的には、第4章で考察した走行車両台数の平均化された変動パターンを推定すればよいとの知見に基づき、交通流を代表する状態変数として平均車両密度、平均車速度、平均流量を選び流体力学的交通流理論に基づく新たな解析アルゴリズムを設立して、交通流推定問題を実験的に考察した。次いで走行車両台数の平均化された変動パターンの代わりに、推定された交通変数のうち平均流量変動パターンを用いて第4章の考察に従い、分布予測が可能であることを示した。特に、信号機の点滅により車両が停車発進を繰り返す状態では、単に存在台数変動パターンを用いたのでは誤差が生じることを示した。

更に、ここまでの考察で問題として残されていた次の2つの問題、1) 第3章で考察したレベル分布表現が無限級数展開表現である問題、2) 実測データを用いて回帰係数を求めている問題、を交通量時間率に基づく分布表現及び計算機シミュレーションデータを用いることにより解決した。この結果単位時間当たりの交通量を入力として、信号一周期内での大略の流量変動パターンを推定した後、大型車混入率を入力情報として与えればこの交通流から発生する騒音のレベル分布を大略予測することが可能であることを示した。

第6章では、第5章の考察結果に基づき、現象の基本的構造を傷つけない範囲で近似化操作を試み簡便で適用容易な信号機周辺での道路騒音予測方式という形で最終的にまとめた。特に第5章での交通流の状態変数推定問題を、第5章で既に考察した平均流量に関する近似化パターンを予め仮定することにより簡易化した。更に、平均流量と騒音の音の強さに関する統計量との回帰的關係を計算機シミュレーションにより求めていた点を、従来の理論的解析結果を援用して改善している。最後に本予測方式を実道路7カ所に適用して、予測精度等を検討し工学的有効性を確認した。

第1章 道路騒音の予測に関する 従来の研究と考察

わが国の高度経済成長に伴い、自動車の保有台数とその交通量が激増し、都市域や幹線道路周辺においては道路騒音は一つの大きな社会問題となっている。このような社会情勢を背景として、例えば新設道路等での騒音の定量的把握と具体的対策の指針を得るために、道路交通騒音予測に関する多くの研究が、従来なされてきたことは周知のとおりである。

本章では、これらの従来の研究を概括してこれまでの騒音予測モデルに対する考察と特色を抽出した後、本研究が考察対象とする信号機周辺での騒音予測に関する研究を行う上での新たな視点を探索する。具体的には、1.1 節では従来の研究を(1)自動車専用道路等での定常な交通流を考察対象とした、特に数学モデルによる予測モデルを中心に概括する。次いで(2)として(1)の道路状況以外での道路状況、例えば車両が非定常走行している等の道路状況を特殊箇所での予測研究としてまとめる。

1.2 節では、上記の従来の予測研究(1)及び、(2)の特に本研究の考察対象である信号機周辺でのこれまでの報告に対する考察と検討を行い、本研究を推進していく上での留意点や方向性を見いだすことを試みる。但し、信号機周辺での従来の報告は実測調査に基づく実験式や計算機シミュレーションモデルがその中心であり、系統的解析指針に基づく予測モデルはないようである。

1. 1 従来の道路騒音予測手法

1.1.1 緒言

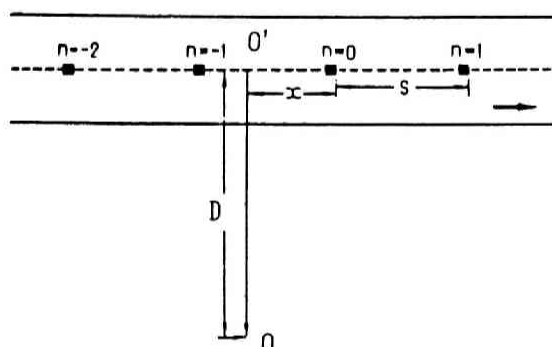
一般に、設定された道路状況下での騒音を予測するためには、1) 個々の車両（騒音源）が発生する騒音の特性と、2) それらの騒音源から観測点への伝搬環境を定量化したうえで、3) 個々の車両が集団として走行する交通流状態を規定する必要がある。従ってこれまでに多くの研究者によりこれら三つの構成要素に関する様々な調査や研究が報告されている。例えば 1) に関しては、車種別での音響パワーレベルの変動特性及びその速度依存性、伝搬特性を考察する上で重要になる周波数特性等に関する調査報告である^{1)~13)}。2) に関しては、幾何学的な音の広がりによる距離減衰の他に、地面による反射・吸収^{7)~12)}、地形・障害物などによる回折^{13)~15)}、気象条件の影響¹⁷⁾等に関する調査や理論的解析である。しかしながら、3) についての報告は 1)、2) での考察対象を例えば実験的にも把握することが可能であるといった問題とは異なり、一つの騒音予測モデルを構成する上で、走行する車両群をどの様に捉えてモデル化するかといった問題であることから、これまでに様々なモデルが提案されている。そこで本節では、従来報告されてきた予測モデルを、特に 3) に関するいくつかのモデル様式に整理して概括する。

具体的には、まず自動車専用道路等で見られる定常な交通流での騒音予測モデル（§ 1.1.2）と、このような道路状況以外、例えば減速、停止、加速、発進といった非定常な交通流が生ずる特殊箇所での予測モデルに大別する。前者の定常交通流での予測手法は、騒音問題が発生した当初より今日まで数多くのモデルが提案されている。定常交通流では車両の配置問題、特に車頭間隔分布の設定問題がモデル構成上の一つの重要なポイント（上述したモデル構成要素 3）となっていることから、本節では解析的に予測することを目的としたいわゆる数学モデルを、適用した車頭間隔分布により整理する（計算機シミュレーション等による予測手法¹⁸⁾も提案されているが）。次いで、道路の分合流点、インターチェンジ、料金所、トンネル抗口部等、本研究が考察対象としている信号機周辺での報告も含めて、従来の予測モデルを、後者の特殊箇所での予測モデルとして概括する。

1.1.2 定常交通流での騒音予測モデル

定常交通流での予測モデルの特色は、車両走行速度一定を仮定していることである。従って、各車両の位置関係を時間や空間に依存しない車頭間隔分布によって、交通流状態を規定すれば騒音評価が可能となる。ここでは、上記観点からモデル化に用いられた車頭間隔分布により従来提案されたモデルを整理する。以下に代表的モデルとして等間隔モデル、指数分布モデルの大略をまとめた後、他のモデルについても若干ふれる。

1.1.2-1 等間隔モデル



第 1.1.1 図 一車線等間隔モデル

頭間隔モデル^{19)・20)・21)}は、図 1.1.1 に示すように無限に長い一直線上を、パワーレベルの等しい無指向性点音源が等間隔、等速度で走行していると仮定したモデルである。観測点 0 での音の強さ I は次式で算定される。^{*1}

$$I = \sum_{n=-\infty}^{\infty} 10 / 2 \pi / (D^2 + (x + nS)^2)$$

^{*1} 原著論文¹⁹⁾では、自由空間を仮定して音の強さ I を算定しているが、この後に示すようにこのモデルは日本音響学会式の基本式となる。そこでは半自由空間を仮定しており、この式との整合性を保つためにここでは半自由空間として記述した。尤も井清は文献¹²⁾で半自由空間ではなく、自由空間での逆自乗則により求まる距離減衰を採用し、その値に対して各要因、例えば地表面に起因する正または負の超過減衰等を求めて補正するのが適切であると述べている。本論文では、交通流をモデル化して騒音予測モデルを考察するといった観点から、この問題には深入りせず、できるだけ原著論文を尊重して以降の章でも記述している。実際に適用する上では一考を要する問題である。

$$= W/2DS \cdot \sinh(2\pi D/S) / (\cosh(2\pi D/S) - \cos(2\pi x/S)) \quad (1.1.1)$$

ここに、 W : 車両1台から放射される音響パワー[W]

D : 観測点 0 から車線までの距離(0-0')[m]

S : 車頭間隔[m]

x : 0' 点(図 1.1.1 参照)から最初の車両までの距離(初期位相)[m]

である。(1.1.1)式より得られる音の強さに関する平均 μ 及び分散 σ^2 は

$$\mu = W/2DS \quad (1.1.2)$$

$$\sigma^2 = (W/2DS)^2 \cdot (\coth(2\pi D/S) - 1) \quad (1.1.3)$$

となる。また騒音レベルの中央値 L_{50} 及び等価騒音レベル L_{eq} はそれぞれ次式で与えられる。

$$L_{50} = L_w + 10 \log_{10} (\tanh(2\pi D/S) / 2DS) \quad (1.1.4)$$

$$L_{eq} = L_w + 10 \log_{10} (1/2DS) \quad (1.1.5)$$

ここに L_w は車両1台の音響パワーレベルである。(1.1.4)式は単純で適用が容易であることから、以下に示すように実道路への適用を考慮する補正を行い、“日本音響学会式”として広く用いられている^{22), 23)}。

$$L_{50} = L_w - 8 - 20 \log_{10} D + 10 \log_{10} ((\pi D/S) \cdot \tanh(2\pi D/S)) + \alpha_a + \alpha_r \quad (1.1.6)$$

ここに、 $S=1000V/Q$ (V :車両速度[km/h], Q :交通量[台/h])

$$L_w = 37 + 0.2V + 10 \log_{10} (a_1 + 10a_2)$$

(a_1 :小型車混入率, a_2 :大型車混入率 ($a_1 + a_2 = 1$))

または

$$L_w = 85 + 0.2V + 10 \log_{10} (b_1 - 8.2b_2 + 16b_3)$$

(b_1 :乗用車混入率, b_2 :小型貨物車混入率, b_3 :大型車混入率 ($b_1+b_2+b_3=1$))

α_0 :回折による補正值

α_1 :沿道における地表条件など種々の補正值

である(詳細な適用条件, 計算手順は例えば参考文献 22)を参照)。ここで, 交通流に対する入力条件が車両速度 V , 流量 Q , 車種混入率 a_i ($i=1, 2$) あるいは b_i ($i=1, 2, 3$) であることには留意を要する。また, (1.1.4) 式による L_{80} は無限長道路を仮定していたが, 実際には無限長道路と見なせない場合も少なくない。このような有限長道路に対しても適用可能な L_{80} を与える式についても既に考察されている²⁴⁾。

1.1.2-2 指数分布モデル

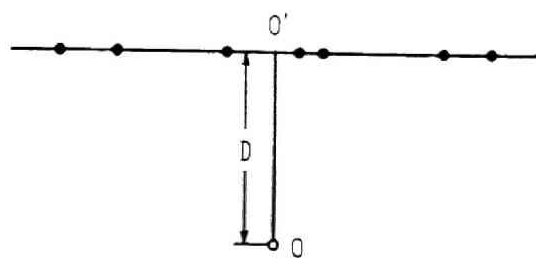
等間隔モデルは, 特に(1.1.6) 式によるかなり精度の良い L_{80} 値を与えるモデルとして有効性は認められているものの, 交通流モデルとしては単純であり, 各車両間のゆらぎを認めないかなり現実ばなれしたモデルといえよう。このようなことから, より実交通流へ近づけた車頭間隔分布として指数分布に基づく騒音予測方式がこれまで多くの研究者により提案されている^{25)~24)}。尚, 車頭間隔が指数分布に従うとすれば, ある道路区間内に存在する車両台数はポアソン分布に従うことになる。ここでは, 最も早くからこの指数分布モデルに関する解析を系統的に行っている高木らの考察を, 文献25)~28)に従って大略を記した後, 他の研究者による考察についても若干ふれる。

図1.1.2(a)に示すように, 音響パワーの等しい車両が無限に長い一直線上を車頭間隔が平均 \bar{d} の指数分布に従い等速度で走行していると仮定する。更にそれぞれの車両を無指向性点音源とみなし, 伝搬環境として自由空間を仮定する。このモデルはいわゆる一車線等パワー指数分布モデルと呼ばれる。車線から D 離れた観測点 O での音の強さ I_w は

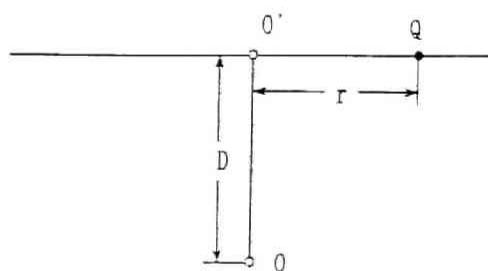
$$I_w = \sum_{j=-\infty}^{\infty} W/(4\pi)/(D^2+x_j^2) \quad (1.1.7)$$

となる。但し, W は各音源の音響出力, x_j は O 点から j 番目の車両までの距離である。従って騒音レベル L は

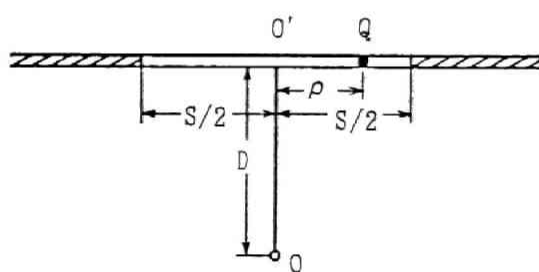
$$L = L_w + 10 \log_{10} \left(\sum_{j=-\infty}^{\infty} 1/(4\pi)/(D^2+x_j^2) \right) \quad (1.1.8)$$



(a)



(b)



(c)

第 1.1.2 図 (a):一車線指数分布モデル,

(b):点音源による (a)の等価モデル

(c):点音源と線音源による (a)の等価モデル

となる。ここに、 L_w はパワーレベルである。ここで、

$$I = \sum_{j=-\infty}^{\infty} 1/(4\pi) / (D^2 + x_j^2) \quad (1.1.9)$$

とおき、 I に関する統計量（平均、分散等）及び確率密度関数等を以下に考察する。まず I に対する特性関数 $g(t)$ は

$$g(t) = \langle \exp(itI) \rangle_I \\ = \exp(K(t))$$

ここに

$$K(t) = 1/S \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \{ \exp(it/(4\pi)/(D^2 + x_i^2)) - 1 \} dx \\ - D\pi/S \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n-1)!!/(2n-2)!!/n! \cdot (it/4\pi D^2)^n \quad (1.1.10)$$

で与えられる。従って、 $\ln g(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (it)^n/n! \cdot K_n$ で定義される n 次キュムラント K_n は

$$K_n = D\pi/S \cdot (2n-1)!!/(2n-2)!! \cdot (1/4\pi D^2)^n \quad (1.1.11)$$

で示されることから、 I の平均 μ_I 、分散 σ_I^2 は次式となる。

$$\mu_I = K_1 = 1/4 D S, \quad \sigma_I^2 = K_2 = 1/32 \pi D^3 S \quad (1.1.12)$$

I の確率密度関数 $p(I)$ は $g(t)$ を逆変換することにより

$$p(I) = 1/2\pi \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \{ \exp(itI) \cdot \exp(K(t)) \} dt \quad (1.1.13)$$

で表される。(1.1.13)式は $D \rightarrow 0$ の場合には厳密に求めることが可能である。即ち、

$$K(t) \Big|_{D \rightarrow 0} = 1/S \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \{ \exp(it/(4\pi x_i^2)) - 1 \} dx = -1/S \cdot (-it)^{1/2} \quad (1.1.14)$$

となるので、このときの $p(I)$ は

$$p(f) \Big|_{D \rightarrow 0} = 1/(2\pi^{1/2}S) \cdot f^{3/2} \cdot \exp(-1/(4S^2 f)) \quad (1.1.15)$$

となる。(1.1.13)式は $D \rightarrow 0$ という特別な場合を除いては積分の厳密解を求めることは困難である。高木らは次の条件を満足する関数 $K_1(t)$ で $f(t)$ を近似した。

- 1) $D \rightarrow 0$ 及び $D \rightarrow \infty$ で $K_1(t) = f(t)$,
- 2) $\exp(K_1(t))$ のフーリエ変換 $p_1(f)$ を求めることができ、かつ $p_1(f)$ が確率密度関数としての性質をそなえている,
- 3) $p_1(f)$ から定まる平均値 μ_{f1} が (1.1.12) 式の μ_f と一致し、分散も同式の σ_f^2 に近い値となる。

このよう条件を満足する $K_1(t)$ として次式を採用した。

$$K_1(t) = 2D\pi^2/S - \pi^{2/2}/S \cdot (4\pi^2 D^2 - it)^{1/2} \quad (1.1.16)$$

但し,

$$h = (D\pi/S)^2 / (1 + (D\pi/S)^2) \quad (1.1.17)$$

である。従って、 $p(f)$ の近似式 $p_1(f)$ は

$$\begin{aligned} p_1(f) &= 1/2\pi \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \{\exp(itf) \cdot \exp(K_1(t))\} dt \\ &= 1/(2\pi^{(1-h)/2}S) \cdot f^{3/2} \cdot \exp\{\pi^{-1}(2D/S - 4D^2 f - 1/(4S^2 f))\} \end{aligned} \quad (1.1.18)$$

で示される。平均 μ_{f1} 、分散 σ_{f1}^2 はそれぞれ次式で与えられる。

$$\mu_{f1} = 1/4DS \quad (1.1.19)$$

$$\sigma_{f1}^2 = K_{2f} = 1/32\pi^{-1}D^3S \quad (1.1.20)$$

次いで、 $L_w=0$ のときの騒音レベルは $L=10\log_{10} f$ とおき (1.1.18) 式を保則変換すること

により得られ、これより騒音レベルの平均 μ_{L_1} 、分散 $\sigma_{L_1}^2$ が求まる。高木らは、 μ_{L_1} 、 $\sigma_{L_1}^2$ に対するシミュレーション実験を行うことにより近似精度を検討し、(1.1.18)式の近似が極めて良いこと、即ち(1.1.16)式の近似が良いことを示している。さらに、実道路へ適用する上で、(1)パワーレベルの異なる車両が混在する場合、(2)このパワーレベルが変動する場合を、考察している。これら2つの問題に対しても、基本的には、(1.1.7)～(1.1.20)式までの一車線等パワー指数分布モデルの解析に帰着することにより解決出来ることを示している（詳細は文献26）を参照）。

騒音の評価量として L_{60} をはじめ一般に L_x を陽表示することは重要である。この問題に対し、高木らは図1.1.2(b) に示す“一点音源モデル”で近似することを試みている。即ち、

$$L = L_w + 10 \log_{10} (a / 4\pi / (D^2 + r^2)) \quad (1.1.21)$$

と表す。ここで r は次の確率密度関数に従うと仮定する。

$$p(r) = 2B/S \cdot \exp(-\pi B^2 r^2 / S^2) \quad (r \geq 0) \quad (1.1.22)$$

今、 $I_2 = a / 4\pi / (D^2 + r^2)$ とおき、 $D \rightarrow 0$ のとき $a=1$ 、 $B=1$ となるように定数 a 、 B を選ぶとすれば、 $I_2 = 1 / (4\pi r^2)$ となるので I_2 の密度関数は(1.1.22)式より

$$p(I_2) \Big|_{D \rightarrow 0} = 1 / (2\pi^{1/2} S) \cdot I_2^{-3/2} \cdot \exp(-1 / (4S^2 I_2)) \quad (1.1.23)$$

となり(1.1.15)式と一致することに着目する。即ち、 I_2 の平均 μ_{I_2} 、分散 $\sigma_{I_2}^2$ が(1.1.12)式と一致するように定数 a 、 B を定める等価問題として解析することを試みている。結果のみ示せば、

$$a = \exp(-\pi B^2 D^2 / S^2) / B / \operatorname{erfc}(\pi^{1/2} B D / S) \quad (1.1.24)$$

$$(1.1.25)$$

$$B = \{ S / ((2\pi)^{1/2} D) \cdot (1 + 2(\pi D / S)^{1/2})^{1/2} \} / \{ 1 + S / ((2\pi)^{1/2} D) \cdot (1 + 2(\pi D / S)^{1/2})^{1/2} \}$$

と表される。一方、騒音レベルは(1.1.21)式に示すように r の単調減少関数として表され

ることから L_x を与える r (これを r_x と記す) は次式を満たす。

$$\int_0^{r_x} \rho(t) dt = \int_0^{r_x} 2B/S \cdot \exp(-\pi B^2 t^2 / S^2) dt = 0.01x$$

即ち,

$$r_x = C_x S / B / (2\pi)^{1/2} \quad (1.1.26)$$

と定まる。ここに、 C_x は次式を満たす定数であり標準正規分布表から容易に求められる。

$$\int_0^{C_x} 1/(2\pi)^{1/2} \cdot \exp(-t^2/2) dt = 0.01x/2$$

結局、 L_x は次式と与えられる (詳細な議論は文献27) を参照)。

$$L_x = L_w + 10 \log_{10} \{ a/4\pi / (D^2 + r_x^2) \} \quad (1.1.27)$$

図1.1.1(a), (b) に示すモデルの考察に基づき、図1.1.1(c) に示すような受音点に近い位置にある一つの点音源 (久野らの最近接音源の考え方³⁰⁾) と線音源 (線音源密度は $1/S$) に置き換えて解析することも考えられる。受音点での騒音レベル L は点Qの位置を ρ とすると次式となる。

$$\begin{aligned} L &= L_w + 10 \log_{10} \{ 1/4\pi / (D^2 + \rho^2) + 1/(4\pi S) \cdot \int_{S/2}^{\infty} 1/(D^2 + x^2) dx \} \\ &= L_w + 10 \log_{10} \{ 1/4\pi / (D^2 + \rho^2) + 1/(4\pi S) \cdot (\pi - 2 \tan^{-1} S/2D) \} \end{aligned} \quad (1.1.28)$$

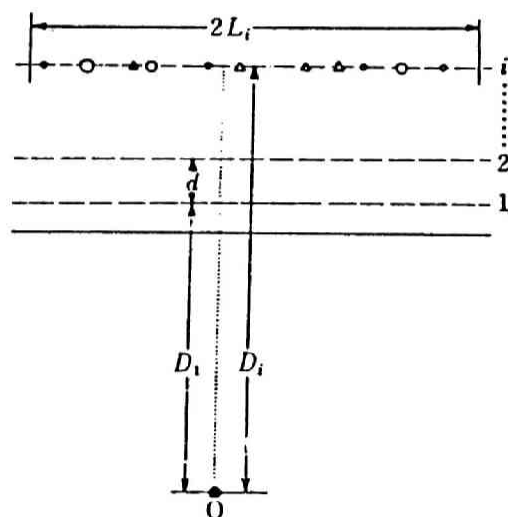
$D = 0$ での (1.1.27) 式による L の中央値 L_{50} と (1.1.28) 式による L_{50} が一致するよう ρ を一旦定める (この ρ を ρ_{50} と記す) と

$$\rho_{50} = 0.68851 \cdot S/2 \approx 0.64 \cdot S/2 \quad (1.1.29)$$

となる。この ρ_{s0} を用いることにより (1.1.28) 式により L_{s0} の近似式を与えることが可能となる。(1.1.28) 式による L_{s0} は D/S の広い範囲にわたってシミュレーション計算結果とよい一致性を示すだけでなく、 D/S が大きい範囲で (1.1.27) 式による L_{s0} の近似式と比較して、よりよい一致性が得られる。さらに、同様の考え方に従ってモデルを有限長道路での L_{s0} を与える式へと拡張することが出来る (詳細は文献28) 参照)。

以上記したごとく高木らは最も単純な一車線等パワー指数分布モデルでの解析結果を基盤として、騒音の評価指標である L_{s0} , L_x 特に L_{s0} の近似式を提案する一方、より現実的な多車線・多車種の道路状況とその音響パワーのゆらぎを考慮したモデルや有限長道路状況への対応を、この単純なモデルへの等価問題として取扱い可能であることを示している。

他方、このような単純化されたモデルから解析を出発させるのではなく、図1.1.3 に示すように始めから、多車線の有限長道路でパワーのゆらぎを考慮にいたれた多車種の車両が走行している道路状況から解析するモデルを太田らは提案している³²⁾。結論式のみ示せば、観測点0における音の強さに関する n 次キュムラント $f_{n,i}$ は



第 1.1.3 図 多車線・多車種・指数分布モデル

$$f_{n,i} = \sum_{i=1}^Q \sum_{\lambda=1}^{\Lambda_i} N_{0,i} \cdot \lambda \theta_i \cdot \langle (a_i \cdot \lambda W_i / 4\pi)^n \rangle_{\lambda W_i} \cdot \langle 1 / (D_i^2 + R_p^2) \rangle^n \quad (1.1.30)$$

である。ここに、 Q :車線数、 Λ_i :第 i 車線での車種数、 $N_{0,i}$:第 i 車線で $[-l_i, l_i]$ に存在する平均車両台数、 $\lambda \theta_i$:第 i 車線での λ 車種混入率、 a_i :第 i 車線での伝搬に関する係数($a=1$ のとき自由空間、 $a=2$ のとき半自由空間モデルとなる)、 λW_i :第 i 車線での λ 車種の音響パワー($p_{\lambda W_i}(\lambda W_i)$ に従って変動する)、 D_i :第 i 車線と観測点0との距離、である。特に無限長道路($l_i \rightarrow \infty$ ($i=1, 2, \dots, Q$))での音の強さの n 次キュムラント $f_{n,i}$ は(1.1.30)式より

$$f_{n,i} = \sum_{i=1}^Q \sum_{\lambda=1}^{\Lambda_i} (D_i \cdot \pi / S_i) \cdot (2n-3)!! / (2n-2)!! \cdot \lambda \theta_i \cdot \langle (a_i \cdot \lambda W_i / 4\pi)^n \rangle_{\lambda W_i} \quad (1.1.31)$$

となる。(1.1.31)式が(1.1.11)式を拡張して得られることは、(1)観測点0での音の強さ I は各車線からの独立な音の強さの和で与えられる、(2)各車線内で各車両の車頭間隔分布は指数分布に従うことから各車両の位置分布は独立で一様分布となる、(3)独立な確率変数の和の分布のキュムラント量は各独立な分布のキュムラント量の和となる、ことから容易に理解される。但し、(1.1.11)式では等パワーモデルを仮定していることから音響パワーのゆらぎに関する部分は既に L_w として分離している。

太田らは、高木らが特性関数を逆変換することにより近似的にも音の強さや騒音のレベル分布を獲得したのとは異なり、(1.1.30)式あるいは(1.1.31)式で与えられる $f_{n,i}$ を用いて、予め与えた直交展開型確率密度関数表現³⁹⁾を具体化する手法を提案している。この分布表現手法は展開表現であるため、(1)分布形状の全体像が分かりにくい、(2)収束性あるいは考慮すべき展開項数の問題、(3)(1)の問題点とも関連して、 L_x 、特に L_{s0} の陽表現が高木らが示したようなコンパクトな形で示せない、等の難点がある。しかしながら、(1.1.31)式は現実の道路状況をかなり考慮した音の強さのキュムラントに関する評価式である。第6章では、この評価式を利用して考察する。

この他指数分布モデルに関して、久野らは1次元、2次元および3次元に点音源が散在する場合での受音点の音響パワーの確率分布を考察し、最近接音源に留意した確率分布の近似式を示している³⁹⁾。

何れにしても等間隔モデル同様、車両速度、車種混入率および流量が予測のための入力情報となっている点には留意を要する。

1.1.2-3 その他のモデル

車頭間隔分布として等間隔、指数分布をスペシャルケースとして含むアーラン分布³⁷⁾、 Γ 分布、更に Γ 分布を初項とする統計的ラゲール展開表現³⁸⁾に基づくモデルが研究されている。

太田らは、Random Point System に対する R.L.Stratonovich の考察を基幹として、任意の伝搬環境のもとで等間隔、指数分布等の特定の車頭間隔に限定しない任意の交通流形態における考察を行っている³⁹⁾。また、ポアソン交通流（車頭間隔分布は指数分布となる）を基幹とした非ポアソン交通流に基づくモデルも発表している⁴⁰⁾。

1.1.3 特殊箇所での騒音予測モデル

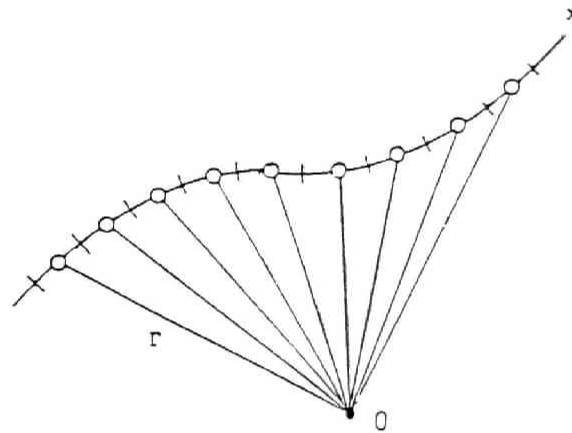
定常交通流では、無指向性点音源が直線道路を一定速度で走行する。従って各車両の発生パワーの性状及び車頭間隔分布が時間的、空間的に不変であるといった仮定より比較的容易に、各車両からの伝搬騒音が観測点で総和可能となり、多くの数学モデルによる予測手法が提案されていることを §1.1.2 で示した。

一方このような道路状況、交通流に対する仮定が成立しない場合、特に (1.1.6) 式による日本音響学会式の適用が困難である場合もしばしば発生する。このような道路状況は“道路特殊箇所”と呼ばれ、具体的には非定常走行、曲線道路、有限長道路を含む箇所での道路の分合流点、インターチェンジ部、料金所、トンネル抗口付近などがこれに該当する。このような道路状況では、一般に数学モデルによる解析的な予測は困難となり、むしろ複雑な伝搬環境・交通流状態の配慮が可能となる計算機シミュレーションによる予測が多く用いられている^{41) - 46)}。ここでは文献 45), 46) に示されている基本的な考え方に従ってまとめる（トンネル抗口周辺での理論的考察⁴⁷⁾もあるが）。次いで本研究が考察対象とする信号機の影響を受けた市街地交差点周辺でのシミュレーション手法の例を示す。

1.1.3-1 計算機シミュレーションによる予測法の基本的な考え方

計算機シミュレーションによる予測法の基本的な考え方は、車両1台が走行したときの観測点での騒音レベル変動のタイムパターン（ユニットパターンと呼ばれる）をまず推定することである。次いで交通流を設定して複数のユニットパターンを計算機内で合成し、騒音レベルの時々刻々の変化を時系列として算出するものである。得られた時系列データからは騒音のレベル分布をはじめ L_{eq} , L_{90} 等の指標が計算される。交通流の設定法は § 1.1.2 に示した車頭間隔分布に基づく手法もあるが、道路状況により異なるので、ここではユニットパターンの推定法に関して記す。

基本となるユニットパターンの推定法としては、縮尺模型実験による方法と、音の伝搬経路を細かく設定し、それらに関するデータを全て入力してシミュレーション計算を行う方法が考えられる。ここでは、後者の手法について述べる。



第 1.1.4 図 ユニットパターンのモデル

図 1.1.4 に示すように考察対象道路を細かく分割し、ある分割点での車両1台の音響パワーレベルを L_w 、放射方向は半自由空間とすれば観測点での騒音レベル L_a は次式となる。

$$L_a = L_w - 8 - 20 \log_{10} r + \Delta L_d + \Delta L_r + \Delta L_m + \Delta L_a$$

ここに、

L_a : 観測点における騒音レベル [dB(A)]

L_w : 車両1台の音響パワーレベル [dB(A)]

r : 車両から観測点までの直線距離 [m]

ΔL_d :地形あるいは音響障害物による回折効果による減衰補正值 [dB(A)]

ΔL_g :地表面性状の影響による減衰補正值 [dB(A)]

ΔL_m :気象条件（風速，風向）による補正值 [dB(A)]

ΔL_a :上記以外の不確定要因を含む最終補正值 [dB(A)]（計算値と実測値の相違を補正する値）

である。

音源を順次移動させることにより，一つのユニットパターンが得られるが r が変化するのみならず， L_w ， ΔL_d 等の因子も同時に変化するのでこれらのすべてを計算機に入力しておく必要がある。以下では，特に L_w ， ΔL_d ， ΔL_g の設定法の大略を記す。 ΔL_m ， ΔL_a は現段階で検討，未定事項となっている。

(1) 車両の音響パワーレベル L_w

車両の音響パワーレベル L_w を規定する因子として，現在主として考慮されているものは1) 車種（大型車・小型車の2分類あるいは大型車・小型貨物・乗用車の3分類），2) 車両速度，3) 加速度，4) 道路勾配である。これらのうち 1)と2)に関しては表 1.1.1 にまとめて示す（4.2 節，5.2 節のシミュレーションで用いる）。3) に関しては表 1.1.2 に示しているが，必ずしも十分なデータに基づいたものではないようである。文献 43) では加速度区間での L_w を機関回転数の対数に比例するモデルを用いている。文献 41) では加速度と走行速度により使用ギヤを推定し， L_w を決定している（後述）。4) に関しては道路勾配 i [%] により全車種とも次式に示す補正 ΔL_i [dB(A)] を施す⁴⁸⁾。

$$\Delta L_i = 0.3 i + 0.1 i^2 \quad \text{ただし } |i| > 6 \text{ で } i = 6$$

第 1.1.1 表 定常走行時のパワーレベル [dB(A)]

3 分 類			2 分 類		
車 種	パワーレベル	偏差	車 種	パワーレベル	偏差
大型 車類	97+0.2V	3.3	大型車類	97+0.2V	3.3
小型貨物車類	90+0.2V	3.2	小型車類	87+0.2V	3.6
乗用 車類	85+0.2V	2.6			

V:速度[km/h]

第 1.1.2 表 加減速区間のパワーレベル [dB(A)]

状態：停止 → 加速 → 定速						
3 分 類			2 分 類			
車 種	パワーレベル	偏差	車 種	パワーレベル	偏差	
大型 車類	108	3.3	大型車類	108	3.3	
小型貨物車類	101	3.2	小型車類	99	3.6	
乗用 車類	97	2.6				

状態：定速 → 減速 → 停止						
3 分 類			2 分 類			
車 種	パワーレベル	偏差	車 種	パワーレベル	偏差	
大型 車類	97+0.2V	3.3	大型車類	97+0.2V	3.3	
小型貨物車類	90+0.2V	3.2	小型車類	87+0.2V	3.6	
乗用 車類	85+0.2V	2.6				

V:速度[km/h]

(2) 回折効果による減衰補正 ΔL_d

点音源，自由音場の場合として前川チャートを利用する¹³⁾。

(3) 地表面性状の影響による減衰補正 ΔL_s

Thomasson の理論¹⁴⁾に沿って試算し，自動車騒音のスペクトルをあてはめて ΔL_s を次式により与える。

$$\Delta L_s = 0 \quad (r \leq r_0), \quad = -f \log_{10} r/r_0 \quad (r > r_0)$$

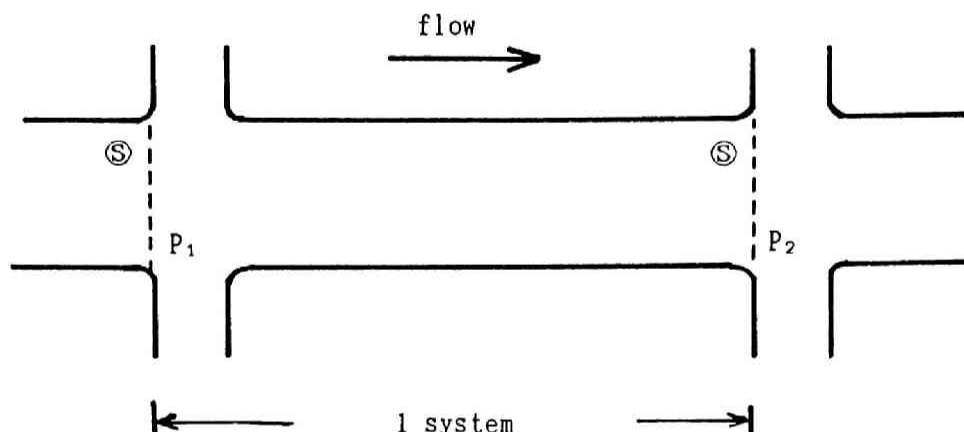
ここに， f : ΔL_s の勾配を与える係数， r : 車両から観測点までの距離[m]， r_0 : ΔL_s を施す必要のある限界距離である（具体的な f ， r_0 の算出法は文献 46) を参照）。

1.1.3-2 市街地交差点周辺での例

都市域への車両の集中に伴い，様々な都市問題が発生している。市街地での騒音問題もその一つである。高速道路や自動車専用道路といった定常的な交通流から発生する騒音とは異なり，連なる信号機に制御された交通流から発生する騒音は“脈動”があり，定常的

な騒音よりも心理的により“うるさく”感ずるといった報告もある⁴⁹⁾。

ここでは、市街地での信号機の影響を受けた騒音の予測研究のうち、計算機シミュレーションによる手法を文献 41) に沿って概括する。尚、文献 41) の交通流及び伝搬環境に関するモデルを発展させ、よりきめ細かいシミュレーション可能なプログラムの開発報告もある⁴²⁾。また、他に多くの実道路上での測定結果に基づき、交通量、大型車混入率、道路幅、車線数等のパラメータを用いた実験式による予測手法も報告されている⁵⁰⁾。



第 1.1.5 図 シミュレーションの道路状況

図 1.1.5 に示す信号機が数多く連なる道路状況，具体的には一車線を一方に車両は走行し，交差点を右折左折しないと仮定している。また歩行者や道路端に駐車している車両はないものと仮定して，信号機への入り口 P_1 （システムへの入り口）から同じく入り口 P_2 （システムからの出口）を考察単位区間とする。シミュレーションのための入力情報は（1）流量[台/時間]，（2）大型車混入率，（3）理想的最高速度，（4）信号の点滅周期 である。以下にシミュレーションモデルの大略を記す。

A. 交通流の生成と走行規則

車両の走行状態を設定する上で，車両と車両及び車両と信号機との相互作用のみを考慮する。車両 i は

- (a) $x_i(t)$: 時刻 t での位置
- (b) $v_i(t)$: 時刻 t での速度
- (c) $\gamma_i(t)$: 時刻 t での加速度
- (d) v_{id} : 前方に他の車両が存在する等の制約がないときの理想的車両速度（車種（例えば

大型車・小型車)により異なり, 加速度 $\gamma_{id}(=k \log v_{id})$ に関与する) の4つの情報により規定される。

車両は与えられた流量に応じてランダムに生成され, P_1 から進入してくる。前方車両との時間間隔は最低値(1秒)が設定される。その時の車両速度は, 打ち切りガウス分布で与える。具体的には平均速度は制限時速(フランスの町中では 50 [km/h], 工業地域では 80 [km/h]), 標準偏差は 5 [km/h] とした。また走行中の追従則として, 実道路状況の良い近似となっている次式を設定する。

$$\gamma_n(t+\Delta t) = C_1(v_{n-1}(t) - v_n(t)) + C_2(x_{n-1}(t) - x_n(t) - D_n(t))$$

$$D_n(t) = h_0 + \tau v_n(t)$$

ここに h_0 は $(n-1)$ 番目の車両の車長 [m] であり, τ は n 及び $n-1$ 番目の車両との瞬時での時間的車頭間隔である。

B. 発生騒音のパワーレベル

走行車両のパワーレベルは車種によって異なるが, その走行状態(速度, 加速度等)にも依存する。本モデルは大型車・小型車の2車種に分類したうえで, 次のように使用ギヤによりパワーレベルを与えている。

(1) 小型車

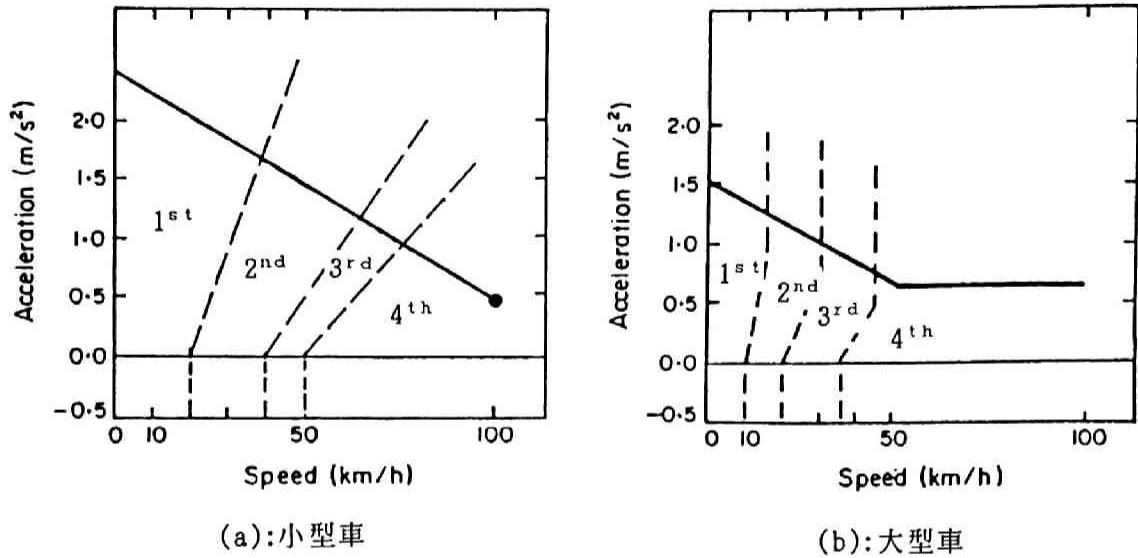
$$L_{wi} = (a_i \log v) + (b_i \gamma \log v) + (c_i \gamma) + d_i$$

ここに v [km/h], γ [m/s²] はそれぞれ瞬時での車速, 加速度であり, a_i, b_i, c_i, d_i ($i=1, 2, 3, 4$) は第 i 番目の使用ギヤにより定まる定数である。ギヤは図 1.1.6(a) に示す加速度と速度の関係から決定する。

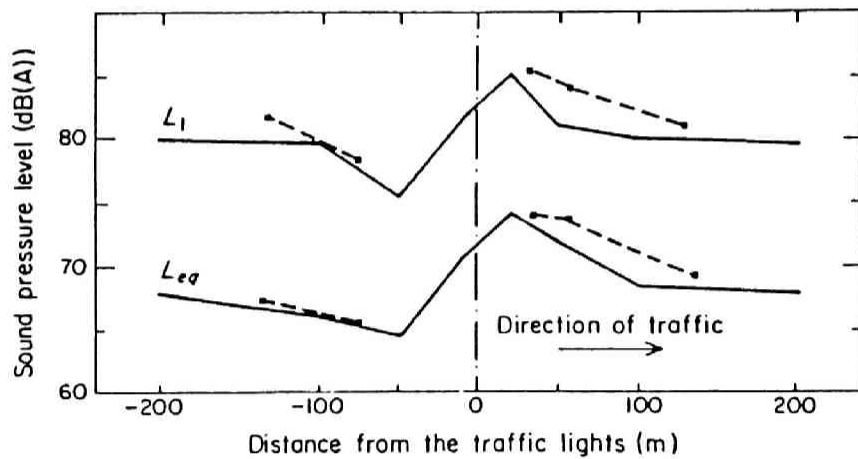
(2) 大型車

$$L_{wi} = (a_i \log v) + b_i$$

ここに V [km/h], γ [m/s²] はそれぞれ瞬時の車速, 加速度であり, a_i, b_i ($i=1, 2, 3, 4$) は第 i 番目の使用ギヤにより定まる定数である。ギヤは図 1.1.6(b) に示す加速度と速度の関係から決定する。



第 1.1.6 図 使用ギヤの決定図 (——— ; 最大加速度)



第 1.1.7 図 信号機を中心としての L_1 と L_{eq} の空間的変動パターン

(- - - - - ; 実測値, 交通量;700[台/h], 大型車混入率;5[%],
交通速度;50-70[km/h], 信号周期;青-50[秒],黄-5[秒],
赤-45[秒])

C. シミュレーション結果

大略上記のようなモデルと自由空間での伝搬環境を仮定して、大型車混入率、流量、及び信号機の点滅時間を入力パラメータとしてシミュレーション結果が示されている。本研究の特色の一つは、図 1.1.7 に示すような L_1, L_2 の信号機を中心とした空間的変動パターンの存在により、信号機の影響を指摘している点である。すなわち、信号機から離れた上流・下流域で騒音指標 L_1, L_2 はともに一定値に近づいていくが、信号機近傍の上流側は、赤信号により車両が停止するため“くぼみ”が生じ、下流側ではこの停止車両の発進により“小山”が生ずることを指摘している。尚、同図中にはシミュレーションと同様な道路状況での実測結果も併せ示している。

1.1.4 結言

従来の道路騒音に関する予測手法を、定常な道路状況での予測手法と特殊箇所での予測手法に大別し、それぞれの代表的予測モデルを概括した。前者のモデルに関しては、計算機シミュレーション等による手法も考察されているが、道路状況、交通流状態等を特徴付けるパラメータにより、まとまった表現で予測可能となる数学モデルを中心にまとめた。これらのモデルは共通に車両走行速度一定、多くは自由あるいは半自由空間での伝搬環境を仮定したうえで、車両の集団的走行状況のモデル化に個々のモデルの特色が見られる。本論文においても交通流とその発生騒音の音の強さとの解析結果を利用することから、最も基本的な等間隔モデル、指数分布モデルについてその大略の解析手順をまとめた。

後者の特殊箇所での予測モデルとは、前者の等間隔モデルを発展させた日本音響学会式が適用できない箇所での予測モデルであり、実に様々な道路状況で考察されている。これらの多くの道路状況では前者の数学モデルによる予測手法とは対称的に、複雑な道路状況・交通流状況が反映可能なシミュレーションモデルが予測手法としてよく用いられている。本論文ではこれらのシミュレーション手法のうち、高速道路でのインターチェンジ部周辺及び市街地での信号機の影響を受けた道路騒音の予測手法を概括した。

上記二つの予測手法に共通して従来の騒音予測手法では、(1) 流量、(2) 大型車混入率、(3) 車両速度（§ 1.1.3-2 に示した交通流に関する動的なシミュレーションが可能な場合は除き）の交通流に関する入力情報を必要としている点には留意を要する。

この節の引用文献

- 1) R. R. K. Jones and D. C. Hothersall; "Effect of Operating Parameters on Noise Emission from Individual Road Vehicles," *Applied Acoustics* 13, 121-136 (1980).
- 2) N. Olson; "Survey of Motor Vehicle Noise," *The Journal of the Acoustical Society of America* 52, 1291-1306 (1972).
- 3) Hideki Tachibana, Teruo Iwase and Kiyoteru Ishii; "Sound power levels of road vehicles measured by a new method using a reverberant tunnel," *The Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* 2, 117-125 (1981).
- 4) R. K. Hillquist; "Motor vehicle noise spectra :their characteristics and dependence upon operating parameters," *The Journal of the Acoustical Society of America* 58, 2-10 (1975).
- 5) M. G. Seshagiri Rao, P. Ramalingeswara Rao and K. Srinivas Dev; "Speed Dependence of Noise Emission Levels of Individual Motor Vehicles in Free Flow," *Acustica* 67, 135-143 (1988).
- 6) 渡辺好章, 野田純一, 姫野有三, 宮山佳彦, ト部泰正; "自動車走行時における騒音のパワーレベル," *日本音響学会誌* 32, 156-160 (1976).
- 7) H. G. Davies; "Noise propagation in corridors," *The Journal of the Acoustical Society of America* 53, 1253-1262 (1973).
- 8) F. M. Wiener, C. I. Malme and C. M. Gogos; "Sound Propagation in Urban Areas," *The Journal of the Acoustical Society of America* 37, 738-747 (1965).
- 9) H. G. Davies; "Multiple-reflection diffuse-scattering model for noise propagation in streets," *The Journal of the Acoustical Society of America* 62, 517-521 (1978).
- 10) 川井孝雄; "Locally reacting な境界面上の音の伝搬に関する考察," *日本音響学会誌* 39, 374-379 (1983).
- 11) S. I. Thomasson; "A powerful asymptotic solution for sound propagation above an impedance boundary," *Acustica* 45, 122-125 (1980).
- 12) 井清武弘; "騒音伝搬に与える地表面の影響," *日本音響学会誌* 38, 270-276 (1982).
- 13) 前川純一; "障壁(塀)の遮音設計に関する実験的研究," *日本音響学会誌* 18, 187-196 (1962).
- 14) 山下充康, 子安 勝; "線状音源に対する障壁の遮音効果-模型実験による検討-, " 日

- 本音響学会誌 29, 207-213 (1973).
- 15) 川井孝雄; “ウェッジによる回折音場の漸近解に関する検討,” 日本音響学会誌 35, 544-553 (1979).
 - 16) 川井孝雄; “半無限障壁による回折音場,” 日本音響学会誌 32, 319-327 (1976).
 - 17) 日高孝之; “音波の屋外伝搬における地表面・気象条件の影響に関する研究,” 京都大学博士論文 175-178 (1986).
 - 18) 庄司 光, 山本剛夫, 中村隆一, 橋本和平, 片山 徹; “モンテカルロ法による交通騒音の推定,” 土木工学会論文集 154, 34-39 (1968).
 - 19) 庄司 光, 山本剛夫, 中村隆一; “街頭騒音とくに交通騒音に関する研究(第一報),” 日本音響学会誌 19, 97-105 (1963)
 - 20) D.R. Johnson and E.G. Saunders; “The Evaluation of Noise from Freely Flowing Road Traffic,” The Journal of Sound and Vibration 7, 287-307 (1968).
 - 21) 石井聖光; “道路交通騒音予測計算方法に関する研究(その1) - 実用的計算式について -,” 日本音響学会誌 31, 507-517 (1975).
 - 22) 日本音響学会, 道路交通騒音調査研究委員会②作業委員会; “道路交通騒音の予測における数学的モデルと評価量について,” (1975.2).
 - 23) 石井聖光; “道路交通騒音予測計算方法に関する研究-高さ別補正值 α_s について-,” 日本音響学会誌 33, 426-430 (1977).
 - 24) 高木興一, 松井利仁, 平松幸三, 山本剛夫; “有限長道路にも適用可能な L_{s0} を与える式について-頭間隔モデルの場合-” 騒音制御 9, 38-42 (1985).
 - 25) K. Takagi, K. Hashimoto, K. Hiramatsu and T. Yamamoto; “Investigation on traffic noise based on an exponentially distributed vehicles model- single line flow of vehicles with same acoustic power,” The Journal of Sound and Vibration 36, 417-431 (1974).
 - 26) 高木興一, 橋本和平, 平松幸三, 山本剛夫; “指数分布モデルに基づく道路交通騒音の研究,” 日本音響学会誌 33, 325-332 (1977).
 - 27) 高木興一, 藤木 修, 平松幸三, 山本剛夫; “指数分布モデルにおける L_x ,” 日本音響学会誌 38, 468-476 (1982).
 - 28) 高木興一, 松井利仁, 平松幸三, 山本剛夫; “有限長道路にも適用可能な指数分布モデルに基づく道路騒音の L_{s0} を与える式について,” 日本音響学会誌 41, 581-585 (1985).

- 29) 宇津正樹, 佐々木恭弘, 信宗正男, 太田光雄; “道路騒音に対する filtered Poisson 過程 model からの実用的ハイブリッド予測法,” 日本音響学会誌 39, 791-797 (1983).
- 30) 久野和宏, 池谷和夫, 三品義昭, “ランダムに分布した点音源群から放射される音響パワーの確率分布,” 日本音響学会誌 30, 268-275 (1974).
- 31) 太田光雄, 山口静馬, 広光清次郎, 畠山一達; “道路新設に伴う市街地騒音レベル分布の一予測理論とシミュレーション実験,” 日本音響学会誌 31, 72-80 (1975).
- 32) 太田光雄, 山口静馬, 広光清次郎; “多車線・多車種・任意長道路の交通騒音予測問題に関する統一的研究(理論とシミュレーション実験),” 日本音響学会誌 32, 403-412 (1976).
- 33) S.Yamaguchi, M.Ohta and K.Nakamura; “A Practical Probabilistic Prediction of Road Traffic Noise from a Filtered Poisson Process Model with a Simplified Elementary Time Pattern of Triangular Type,” Archives of Acoustic 10, 75-91 (1985).
- 34) U. J. Kurtz; “Frequency Curves of Road Traffic Noise,” The Journal of Sound and Vibration 33, 171-185 (1974).
- 35) M.Ohta and T.Koizumi; “General Statistics Treatment of Response of Nonlinear Rectifying Device to Stationary Random Input,” IEEE Transactions on Information Theory IT-14, 595-599 (1968).
- 36) 太田光雄, 生田 顕, 山口静馬; “一般化した交通流モデルによる道路交通騒音の静的予測手法,” 日本音響学会誌 35, 370-379 (1976).
- 37) 高木興一, 平松幸三, 山本剛夫; “道路騒音のレベル変動に関する考察 - アーラン分布モデルについての一考察 -,” 日本音響学会講演論文集 67-68 (1976, 5).
- 38) 太田光雄, 中村一正, 生田 顕; “複合確率過程モデルに基づく道路騒音予測の一般理論と実験,” 日本音響学会誌 37, 437-445 (1981).
- 39) M.Ohta, S.Yamaguchi and A.Ikuta; “Statistical Estimation of Road Traffic Noise in an Arbitrary Sound Propagation Environment by Use of Stratonovich's Theory for a Random Points System,” The Journal of Sound and Vibration 69, 275-283 (1980).
- 40) 太田光雄, 生田 顕, 藤田幸史; “任意交通流状態の道路交通騒音・振動に対するポアソン流を基幹とした系統的一予測法,” 日本音響学会誌 42, 698-707 (1986).
- 41) B.Fave; “Noise at the Approach to Traffic Lights:Result of a Simulation

- Programme," The Journal of Sound and Vibration 58, 563-578 (1973).
- 42) S. Slutsky, W.R. McShane, J.M. Ulerio, S.H. Lee and P.J. Grealy; "Stop and Go Urban Intersection Noise," Transportation Research Record 937, 15-23 (1983).
- 43) 木村彰良, 坂上丈寿; "道路交通騒音のシミュレーションについて," 日本音響学会誌 31, 463-467 (1975).
- 44) I.S. Diggory and B. Oakes; "Computer Simulation Model for the Prediction of Traffic Noise Level," Applied Acoustics 13, 19-31 (1980).
- 45) 日本道路公団; 道路特殊箇所の騒音予測マニュアル (1979.2)
- 46) 佐々木實, 山下充康; "道路特殊箇所の騒音の予測方法に関する検討 - インターチェンジ部周辺 -, " 日本音響学会誌 40, 638-643 (1984).
- 47) 久野和宏, 野呂雄一, 井 研治; "トンネル抗口周辺の道路交通騒音予測について," 日本音響学会誌 45, 507-511 (1989).
- 48) 金安公造, 金泉 昭; 交通公害 (技術書院, 東京, 1976)
- 49) R.R.K. Jones and D.M. Waters; "Interrupted traffic noise," 9 th International Congress on Acoustics, Madrid (1977).
- 50) D. Gilbert; "Noise from Road Traffic (Interrupted Flow)," The Journal of Sound and Vibration 51, 171-181 (1977).

1. 2 従来の予測手法に対する考察と検討

本研究が考察対象とする信号機周辺での道路騒音予測問題は、§ 1.1.3-2 で示したごとく実験式あるいは机上での計算機シミュレーション程度の報告であることから、本研究を推進するうえで、まず実態調査を行い何らかの知見なり解析的指針を得ることから始める必要があろう。このような目的を達成するためにも、従来の予測モデルに対し考察と検討を加え、問題点を抽出しておく必要があろう。本節では、特に以下に示す3項目を取り上げて議論する。

- (A) 音の強さの解析結果に対する考察と検討
- (B) 交通流状況のモデル化に対する考察と検討
- (C) 市街地交差点周辺の例に対する考察と検討

- (A) 音の強さの解析結果に対する考察と検討

騒音レベル分布あるいは騒音指標を予測する基本的手順は、1.1 節で示したように各車両からの伝搬騒音の音の強さに関する総和 L を求めることである。この総和 L は3つの構成要素（§ 1.1.1 参照）により評価され、レベル分布あるいは指標を予測することが可能となる。例えば (1.1.2), (1.1.3), (1.1.12) 式あるいは (1.1.31) 式は L に関する基礎的評価として重要であり、特に低次の統計量はレベル分布形状の大略を決定する。従って、ここではこのような L の低次統計量の評価結果に対する考察と検討を以下に記す。

(1) § 1.1.2 ではモデル化に用いた車頭間隔分布より従来の数学モデルを整理した。しかしながら、現実交通流では設定した車頭間隔分布に従って走行しているわけでは決していない。むしろ多少の変動にもあまり影響を受けない変量に着目して、騒音予測モデルを構成することが重要であろう。例えば、 μ_L (L の平均) は等間隔モデル及び指数分布モデルではともに $1/\delta$ 即ち平均車両密度に比例する ((1.1.2), (1.1.12) 式参照)。このような L の統計量に関する性質は、例えば信号機の影響を受けた非定常な交通流状態（車頭間隔分布自体が時空間的に変容すると思われる状況）ではますます重要となろう。

(2) 車両の音響パワーあるいはパワーレベルは L の評価に直接的に影響を及ぼし、車種、車両速度、加速度に大きく依存していることを示した。§ 1.1.3-2 では、さらに使用ギャ

にも依存したモデルを用いている。しかしながら、実交通流では特に車両速度、加速度はかなり変動していると思われる。従って、加速度は速度の変動による2次的変量と考えれば、平均的パワーレベルの平均的車両速度への依存性とその偏差程度で捉えておくことが重要であろう。但し、停止車両が発進する状況（加速度が大のとき）ではさらに加速度を考慮する必要があると思われる。

以上のことから、個々の数学モデルの差異に捕られるより、 I に関する低次統計量の、大略的性質、及び特に確率的変動要因に対し車両の音響パワーの低次統計量（ $\langle P \rangle$, $\langle P^2 \rangle$ 等）、平均車頭間隔（ J ）、車種混入率といった“平均量”を捉えて置くことが重要であろう。即ち、一旦このような知見が得られるなら、これら“平均量”とその大略的特性に基づき騒音予測モデルの構築を試みることもできよう。

(B) 交通流状態のモデル化に対する考察と検討

(1) 1.1 節で概括した予測モデルの多くは、まず初めに車頭間隔分布によって個々の車両の存在のあり方を規定した後、車種や車速を確定的あるいは確率的に付与している。これは恐らく観測点での I を個々の車両からの伝搬騒音の総和として算出するための必要性からではあるまいか。一方、交通工学の分野では交通流をこのような個々の車両の存在として、いわば微視的に表現する他に、交通流を一種の流体と見なし現象の変化や推移を平均車両密度、平均車両速度、平均流量といった変量を用いて巨視的に捉えて表現する対称的な方法が知られている。

(A) の考察で示したように I に関する基礎的統計量は平均車両密度等の変量によって記述可能である点に留意すれば、非定常な交通流に根ざし騒音問題を考察する上では前者の微視的な方法論より後者の巨視的な方法論が適しているのではあるまいか。

(2) 定常交通流での従来のモデルは、上述のごとく車頭間隔分布と速度を入力情報として設定していた。しかしながら(B)-(1)の考察とも関連して、非定常交通流状況をこのような微視的な交通流理論を基盤にして交通流の動的な振る舞いを記述し、騒音予測モデルを構築することはかなりの困難が予測される。即ち、交通流の非定常的変容は交通流そのものに内在するメカニズムに従っているものであり、人為的に外から与えられるものではあるまい。一般に非定常交通流での予測モデルは、近似的にもこのような交通流の内的メカニズムを記述可能な交通流理論に根ざして考察していく必要があるだろう。

(C) 市街地交差点周辺の例に対する考察と検討

§ 1.1.3-2 では、信号機の影響を受けた道路騒音の予測手法の代表例として、文献41)を概括した。このモデルは計算機シミュレーションによることもあるが、交通流の設定とその発生騒音のモデルは車両速度のみならず加速度及び使用ギヤを考慮にいたしたきめ細かな予測手法である。また L_1 , L_{eq} といった騒音指標の信号機の上流・下流領域での空間的分布を示し、信号機の影響を特徴づけている。

しかしながら、定常騒音に比較し脈動のある騒音をより“うるさく”感じるといった人間の心理的印象の問題からすれば、むしろある観測点を固定して、騒音レベルの“時間的変動”に目を向ける必要があるのではなかろうか。

更に、このような計算機シミュレーション手法全体にいえることであるが、対象をきめ細かく表現し、モデルの中に組み入れていくことが可能である一方、この表現自体も実現象の単なる近似にすぎないことには留意を要する。即ち、個々にはよい近似的表現であっても、これらを総合化し考察対象全体のモデルを構築したとき、実現象とかけ離れたモデルとなることはしばしば経験することである。内的にきめ細かく表現すればするほど、このような危険性が増加するであろう。あるいは、このような不合理な結果とはならないまでも、出力結果が得られるまではどのような結果が得られるのか分からないといった、モデルの見通しの悪さが生じよう。このようなシミュレーションモデルの欠点を補うためにも、考察対象を十分に観察し、まず外見的に捉えておくことが必要であろう。出来れば、この外見的現象から内部に踏み込み、考察対象の中に潜む原理や本性は何なのかを考察し、解析の指針を得ることが重要と思われる。

第2章 信号機が道路騒音に及ぼす影響の実態調査

これまで報告されてきた高速道路や自動車専用道路での騒音に関する多くの研究がそうであったように、信号機の点滅により車両の流れが制御され、その交通流から発生する騒音に関する考察を行うに際しても、その第一歩は現実の交通流状況とその発生騒音に対する実態調査を行うことから始めるべきである。研究者が自ら、現場に立つことなく、耳で騒音を聞くことなく、目で車両の流れを見つめることなく、ただ単に計測器や記録装置によって現象の一部を現場より切り取ったデータを室内で調べるといった姿勢では、現象の本質や構造を暴き出すための糸口さえ発見することは困難であろう。一方、これまで主として行われてきた高速道路や自動車専用道路のような定常な交通流から発生する騒音問題に関して蓄積された実験的あるいは理論的考察結果を拡張・発展させて考察することが困難であることが予想される状況では、これまでの既製の理論やモデルを念頭に置き机上で本考察対象に対する解析の指針を探ることも、現象から遊離した考察を行う危険性を含み成果の少ない多くの時間を費やすこととなろう。

即ち、百聞は一見にしかずの諺どおり、本章では解析の指針を得るために信号機の点滅により影響を受けた交通流とその発生騒音の実測調査を実施する。次いで、実測作業から得られた一つの知見に基づき、特に計測された交通流及び騒音レベルデータのうち比較的处理が容易であり信号機の点滅の影響が結果的に現れていると思われる騒音レベルデータに対し、このような道路状況での騒音レベル変動の特徴抽出を試みる。

2. 1 信号機の点滅が道路騒音に及ぼす影響の実態調査

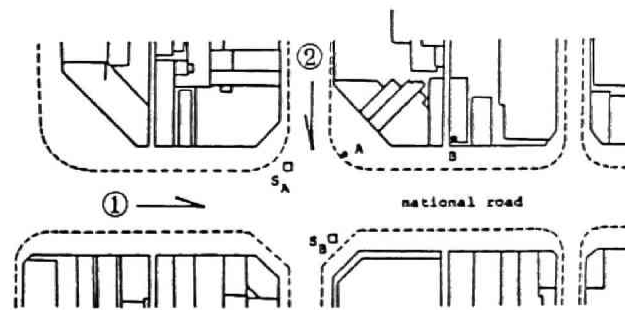
2.1.1 緒言

一般に、物理的法則や因果関係を基盤として考察対象に対して確定論的な議論が可能である場合には、机上での思索的考察から始めて理論的考察を行い、最終的に実現象に適用して出発点であった思考的考察や理論的考察を確認するといった攻究の様式がしばしば採られる。一方、確定論的には論ずることが困難であるような不規則変動現象に対する多くの研究では、まず考察対象を十分に観測すると同時に大量のデータを採取することから始められる。次いで、採取された不規則な揺らぎのあるデータに対して通常様々な平均化操作を施し、揺らぎの除去を行った後、不規則現象に埋もれている各種の情報（平均、分散、相関等）を用いて物理法則や因果関係を基盤として対象の本性や構造を調べるといった方法がよく用いられる。本研究においても、信号機周辺における道路騒音の予測に関する研究を始めるにあたり後者の研究様式に従い、信号機の点滅が道路騒音に及ぼす影響を代表する道路状況を選び実態調査を行い解析の指針を得ることから始める。

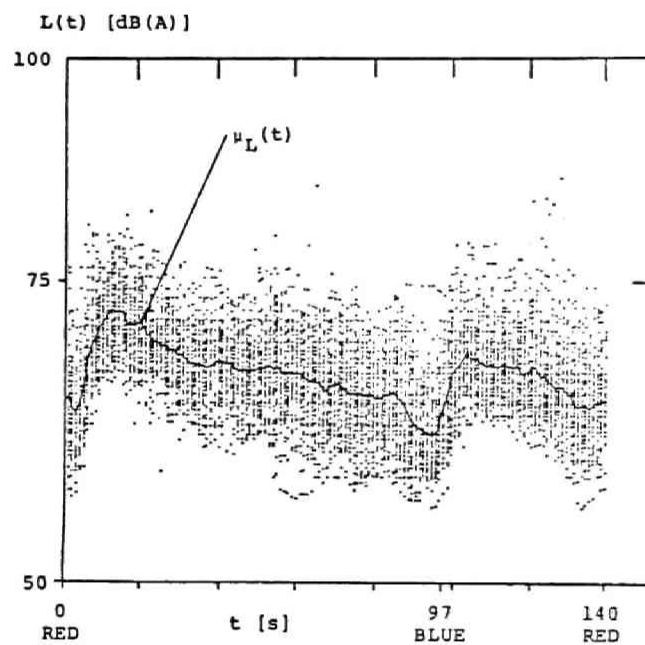
具体的には、1)市街地での交差点、2)幹線道路沿いでの信号機の間、3)自動車専用道路の流入地点に設置された信号機周辺の3箇所で、いずれも信号機の点滅により影響を受けた交通流をビデオ・カメラに収録すると同時に、その交通流から発生する騒音をレベルレコーダに収録するといった方法で実測調査を行う。次いで、各観測地点で得られた共通の知見として、信号機が周期的に点滅するという規則性に着目し、採取した実測データのうち、信号機の影響が結果的に反映していると思われる不規則変動を示す騒音レベルデータに対し、一つの平均化操作を行い考察対象の特徴抽出を試みる。尚、騒音発生源である交通流への影響と騒音との関係については第4章で詳論する。

2.1.2 市街地交差点内における道路騒音の実測調査^{1)・2)}

信号機の点滅による影響を受けた非定常な道路騒音の発生する代表的な箇所の一つとして、市街地交差点が考えられる。第2.1.1図に今回実測調査を実施したときの道路状況（呉市本通り2丁目、四つ道路交差点周辺）を示す。同図中、S_A、S_Bは信号機であり、



第 2.1.1 図 市街地交差点での調査状況



第 2.1.2 図 騒音レベル変動の散布図

S_A の点滅時点を基準とすれば赤信号から次の赤信号の時点まで（信号一周期）が140 [秒]であり，赤信号から青信号の時点までは97 [秒]であった。点Aには騒音計及びレベルレコーダを設置して騒音レベル変動を観測するとともに，点Bの8階建てビル屋上よりビデオカメラを設置して，このときの交通流も同時観測した。観測時間は58周期であった。

現象は信号機の周期的点滅によって繰り返されていることから，まず観測されたデータをサンプリング（サンプリング周期は1 [秒]）して信号一周期内の騒音レベル変動の散布図を作成したものを第 2.1.2 図に示す。信号 S_A が赤を点灯する時刻を $t=0$ [秒]とすれば次に赤信号となるのは $t=140$ [秒]であり現象は $[0, 140]$ 内にのみ存在していると考え

ている。同図中には、平均的レベル変動パターンも併せ示している。この散布図より次のことが推察できる。

1) 平均的レベル変動パターンに着目すると、 S_A が赤を点灯（約3秒後に S_B は青を点灯）すると、②方向の流れが停止、①方向で停止していた車両群が発進・加速し平均的レベル変動パターンに第1のピーク（14〔秒〕前後）を形成する。やがてそのパターンはゆるやかな減少傾向を示しているものも、車両の流れは定常的となり S_B が赤信号を点灯する（①方向の車両の流れが停止する）と急激に降下する（88〔秒〕前後）。次いで、 S_A が青信号を点灯（97〔秒〕）すれば同様に②方向の車両群が発進・加速して第2のピークを形成する。この平均的レベル変動パターンから信号機の周期的点滅の影響が顕著に現れていることが分かる。

2) 騒音レベルの散布状況に着目すると、全ての時刻 t ($0 \leq t \leq 140$) ではほぼ平均的レベル変動パターンに関して上下対称であり、そのバラツキ幅に関しても各時点にそれほど大差はない。

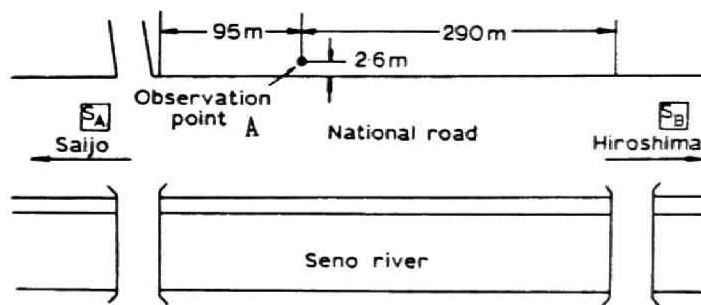
3) 観測点Aの近辺で走行車両がほぼなくなるとされる時点（ $t=4$ 〔秒〕、 $t=97$ 〔秒〕）の近傍で約55〔dB(A)〕となっている。この程度が観測点Aでの暗騒音レベルと推定される。

2.1.3 幹線道路沿いの信号機間における道路騒音の実測調査^{2), 3), 4), 5), 6), 7)}

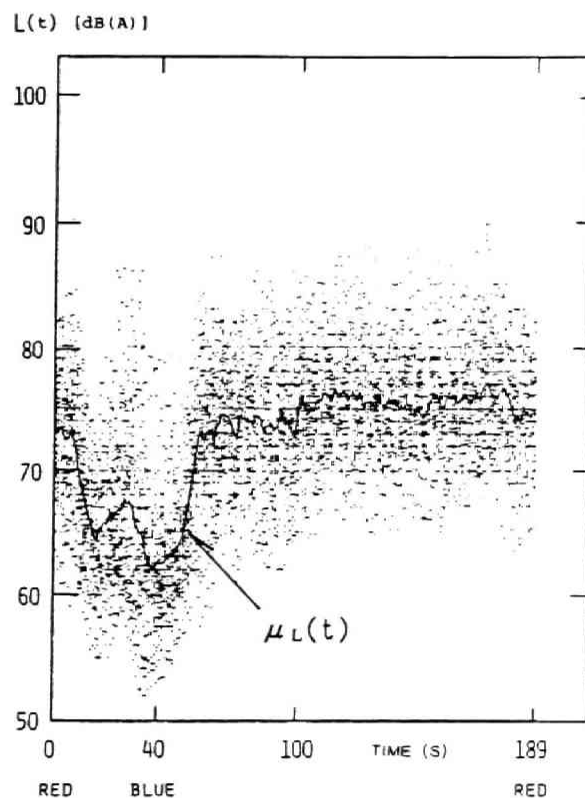
信号機の影響を受けた道路騒音を代表する第2の例として、幹線道路沿いでの信号と信号の中間点（交差点から少し離れた地点）で観測される騒音を選んだ。第2.1.3図にそのときの実測状況を示す（広島市海田町付近）。 S_A 、 S_B は信号機であり、 S_A の点滅時刻を基準とすれば赤信号から次の赤信号（信号一周期）までが189〔秒〕であり、赤信号から青信号まで40〔秒〕であった。点Aに騒音計及びレベルレコーダを設置し騒音レベル変動を観測するとともに、このときの騒音発生源である交通流を第2.1.3図でのSeno riverのはるか下方に位置する山の山腹よりビデオ・カメラを用いて、同時に46周期観測した。

信号機が周期的に点滅し、繰り返し現象となっていることから、§2.1.2での考察に従い、信号一周期内での騒音レベル変動の散布図（サンプリング時間は1秒）を作成したものを第2.1.4図に示す。図中には平均的レベル変動パターンも併せ示している。同図から次のことが推察できる。

1) 平均的レベル変動パターンに着目すると、 S_A が赤を点灯し（ $t=0$ 〔秒〕）主道路の交通流が停止して数秒後、急に平均レベル値が立ち下がり、続いて副道路からの進入車両に



第 2.1.3 図 幹線道路沿いでの調査状況



第 2.1.4 図 騒音レベル変動の散布図

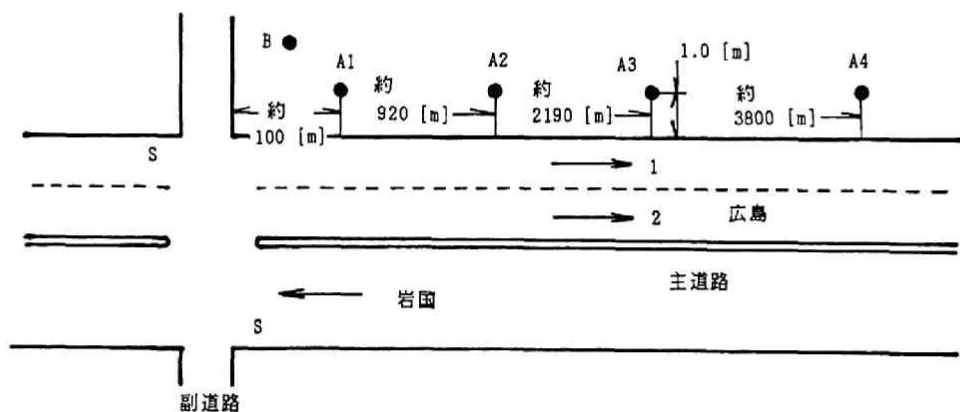
より小さなピーク（ $t=28$ [秒]）を作る。進入車両がなくなった後， S_A が青を点灯（ $t=40$ [秒]）すると平均レベル値が急に立ち上がりやがてほぼ一定（定常状態）となる。§ 2.1.2での交差点の実測例の変動パターンとは異なるものの，この変動パターンにも信号機の周期的点滅の影響が明確に現れている。

2) 騒音レベルの散布状況に関して、すべての時点 t ($0 \leq t \leq 189$) で平均的レベル変動パターンに関してほぼ上下対称であり、そのバラツキの幅に関して各時点ともそれほど大差がないことが分かる。

3) 暗騒音レベルに関して、観測点付近に走行車両がほぼなくなると思われる時点 ($t=40$ [秒] の少し前) から50数 [dB(A)] 程度と推定される。

2.1.4 信号機の点滅影響の空間的変容に関する実測調査⁸⁾

§ 2.1.2での市街地交差点における実態調査及び § 2.1.3での幹線道路沿いの信号機間における実態調査により信号機の点滅による騒音レベル変動に及ぼす影響がかなり明かとなった。従ってこのような信号機の影響が信号機から離れていくに従い、どのようにその影響が変容していくのかに特に焦点を当て、第 2.1.5 図(廿日市市西広島バイパス(自動車専用道路)速谷交差点から東行き約 4 [km]) に示す道路状況で実測調査を行った。同図中 S は信号機であり信号一周期の時間は160 [秒]であった。A1, A2, A3, A4 地点に騒音計及びレベルレコーダを設置し騒音レベル変動が信号機から離れていくに従いその変動形態が

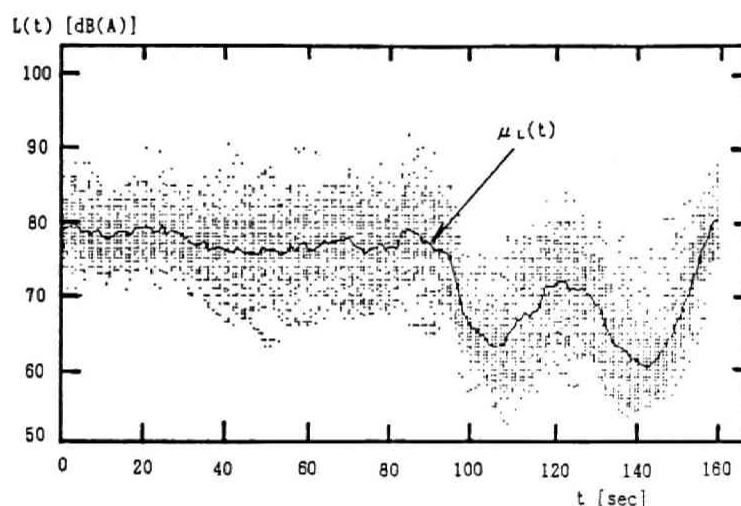


第 2.1.5 図 自動車専用道路流入点付近での調査状況

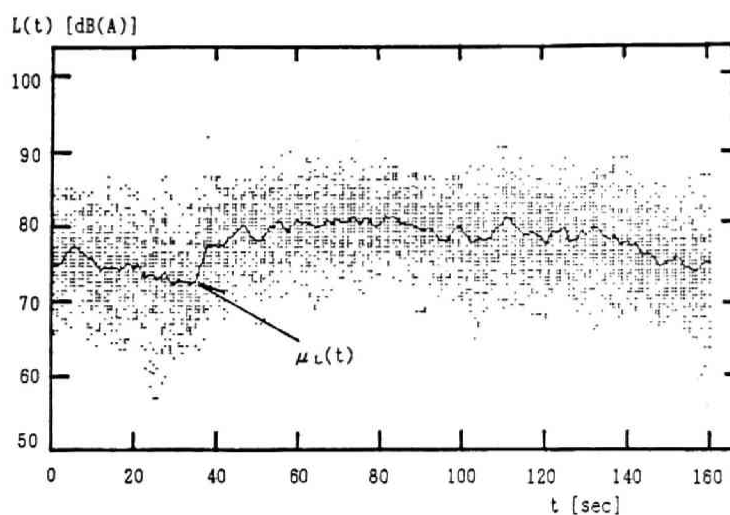
どのように変容していくのか観測した。尚、これらの地点間には1カ所パークエリアがあるのみで車両の流入・流出点はない。またB点にはビデオ・カメラを設置してA1地点で観測される騒音発生源である交通流も同時観測した。観測時間は33周期であった。

これまでの2例と同様、信号一周期内での騒音レベル変動の散布図を各地点ごとに 第 2.1.6 図 (1), (2), (3), (4)に示す。同図中には平均的レベル変動パターンも併せ示している。またこれらの図は前2例と異なり、赤信号から次の赤信号を点灯する間の適当な時点 を基準時点 ($t=0$ [秒]) としている。これらの散布図から次のことが推察できる。

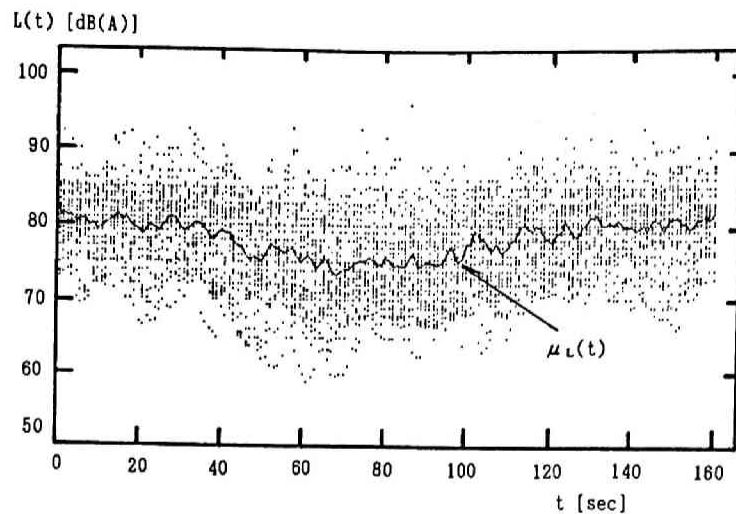
1) 平均的レベル変動パターンに着目すると、信号機の近傍 (A1地点) では § 2.1.3での 幹線道路沿いにおける調査例と同様に信号機の周期的点滅の影響が顕著に変動パターンに 現れている。一方、信号機からA2, A3, A4地点と遠ざかるにつれてその影響は次第に弱まっ



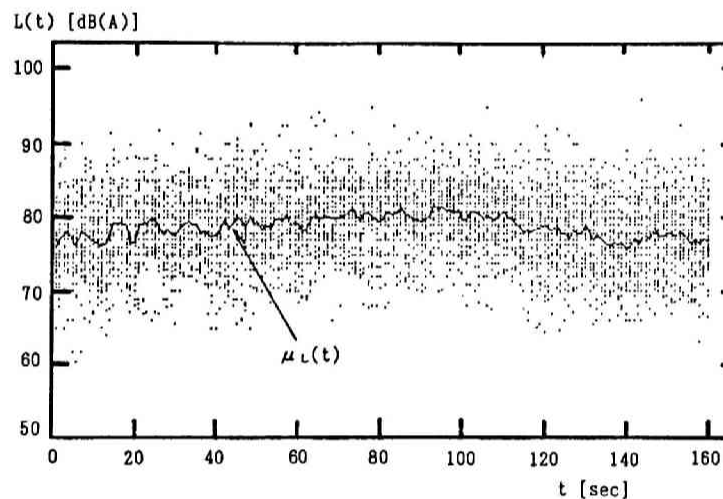
(1) 測定点 A1



(2) 測定点 A2



(3) 測定点 A3



(4) 測定点 A4

第 2.1.6 図 騒音レベル変動の散布図

ていき、約 4 [km] 程度離れば (A4 地点) 平均的レベル変動パターンはほぼ一定値となり定常的となる。

2) 騒音レベルの散布状況に着目すると、これまでの 2 例同様平均値に関して上下対称でありそのバラツキ幅に関しても各時点 t ($0 \leq t \leq 160$ [秒]) で大差のないことが視察される。

3) A1地点付近での暗騒音レベルに関して、観測点付近に走行車両がほぼなくなると思われる時点 ($t=105, 143$ [秒] 近傍) から 50 数 [dB(A)] 程度と推定される。

2.1.5 実測調査のまとめ

信号機の点滅により影響を受けた交通流とその発生騒音がどのような変動形態を示すかに関する知見を得るために代表的な道路状況3カ所;1)市街地交差点, 2)幹線道路沿いの信号機間, 3)自動車専用道路の流入地点に設置された信号機周辺, で実測調査を実施した。次いで, 実測現場で得た知見—考察対象は共通して信号機が周期的に点滅することによって引き起こされる繰返し現象である—に基づき, 特に信号機の影響が結果的に現れていると思われる騒音レベル変動に対して, 信号一周期内での騒音レベルの散布図を作成した。その結果, 次のことが明かとなった。

- 1) 騒音レベルの平均的変動パターンは, 各測定点ごとにその付近での信号機に制御された信号一周期内での車両の流れの様子を窺わせる固有な変動パターンを示す。
- 2) 騒音レベルの散布状況は, 信号一周期内の任意の時点で平均値に対しほぼ上下対称にデータが散布しており, その散布幅にも各時点でそれほど大差は見られない。
- 3) 測定点で暗騒音レベルが問題となるのは, 信号機が赤から青あるいは青から赤(時間の短い黄信号は無視している)を点灯する近傍の車両の流れが途切れる時点である。
- 4) 1)で記した騒音レベルの平均的変動パターンは信号機の近傍では顕著であるが, 信号機の下流に行くに従い次第にその変動パターンは形状を変え, 約 4 [km] 程度離ればほぼ一定値となり定常的な騒音レベル変動を示す。

2.1.6 結言

信号機周辺における道路騒音評価の予測問題を攻究するにあたり, 解析の指針を得るために実道路3カ所で実測調査を行った。その結果, 共通に考察対象は信号機が周期的に点滅することによって引き起こされる繰返し現象であるとの知見を得た。特に, 実測した騒音レベルデータを用いてこの知見を確認した。このような指摘は道路交通騒音に関するこれまでの研究成果の中に含まれておらず, 新たな一発見であることには留意すべきである。本節で得た知見は以下の各章での理論的解析の指針的役割を果たし, 本研究の基幹をなすものとなる。

この節の引用文献

- 1) Y.Kato and S.Yamaguchi; "A Prediction Method for Probability Distribution of

- Road Traffic Noise at an Intersection,” *Acoustics Australia*, 18(2), 45-50 (1990).
- 2) S.Yamaguchi and Y.Kato; “A Statistical Study for Determining the Minimum Sample for L_{eq} Estimation of Periodic Nonstationary Random Noise,” *Applied Acoustics*, 32(1), 35-48 (1991).
 - 3) 加藤裕一, 山口静馬; “信号機による非定常道路交通騒音の一予測方法,” *日本音響学会誌*, 44(7), 510-514 (1988).
 - 4) S.Yamaguchi and Y.Kato; “A Prediction Method of Non-stationary Road Traffic Noise based on Fluctuation Patterns of an Average Number of Flowing Vehicles,” *Applied Acoustics*, 27(2), 103-118 (1989).
 - 5) S.Yamaguchi and Y.Kato; “A practical method of predicting noise produced by road traffic controlled by traffic signals,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86(6), 2206-2214 (1989).
 - 6) 加藤裕一, 山口静馬; “交通流状態変数の推定法と騒音レベル分布予測への応用,” *日本音響学会誌*, 46(6), 458-467 (1990).
 - 7) 山口静馬, 加藤裕一; “交通量時間率に基づく周期的非定常道路騒音の分布予測,” *日本音響学会誌*, 47(10), 723-728 (1991).
 - 8) 加藤裕一, 山口静馬; “非定常道路交通騒音の空間的変容に対する実態調査,” *日本音響学講演論文集* 605-606 (1991.10).

第3章 信号機周辺における道路騒音のレベル分布予測

道路交通騒音のレベル変動性状の一つの特徴は、道路状況によってその様相をかなり変えることである。交通量が多い時は、車両一台ごとの騒音レベル変動パターンが重ね合わさって騒音レベルは不規則かつ大幅に変動する。これに対し、交通量が極端に少なくなるとほとんどの時間はその地点での暗騒音に支配され、車両が通過するたびに一過性の変動パターンを示すようになる。一方、このような不規則な変動性状を示す道路騒音に対して、人間の心理的印象との相関性の良さ等の様々な観点から道路騒音を代表する評価量として、 L_{50} 、 L_{10} 、 L_{eq} 、 L_{dn} 、 L_{NP} 、TNI等が今日まで提案され、設定された道路状況下でこれらの騒音指標を予測する多くの研究成果が蓄積されている。しかしながら、これらは一つの騒音レベル変動現象に対して算定されるものであり互いに独立な量ではなく、例えば騒音レベル分布が与えられるならば、この分布より導出可能となる量である。即ち、道路騒音の評価量を予測する上で、まずレベル分布の予測を行うことは重要である。

本章では、信号機の周期的点滅によって影響を受けた道路騒音の評価予測を行うための第一歩として、結果的に得られる騒音レベルが長時間で示す変動分布を表現することを考察する。第2章では考察対象は信号機の周期的点滅による繰り返し現象であり、信号一周期以内での騒音レベル変動の統計量、特に平均値に、その信号機の影響が顕著に現れた変動パターンが存在することを示した。従って、本章ではこの信号機の影響が結果的に現れているこの変動パターンに着目し、変動パターンが与えられた場合での目的の分布表現手法に関して理論的並びに実験的に考察する。

一般に、不規則な変動現象を把握する基本はまず平均や分散等の低次統計量から捉えていくことから始まる。従って3.1節では騒音レベル変動の平均値のみが周期的に変動し、2次以上の統計量は一定である場合について理論的考察を行う。この後、実験的にその正当性を検証する。更に、理論的考察の実用化手法に関しても具体的検討を行う。次いで、3.2節では高次レベル統計量の周期的変動特性まで考慮した一般的なレベル分布表現に関する理論的考察、並びに実験的検討を行う。

尚、レベル統計量の変動パターンが信号機の影響を受けた騒音発生源である交通流から、どのように与えられるかに関する考察は第4章以降で詳述する。

3. 1 レベル平均値の周期的変動に着目した騒音レベル分布予測^{1), 2)}

3.1.1 緒言

信号機の影響を受けた騒音レベル変動現象の特色の一つは繰り返し現象であり、そのレベル統計量、特に平均値に周期的変動パターンが存在することを第2章の実測調査より明かにした。本節では、この知見に基づき特にレベル平均値のみが周期的変動を示し、2次以上の高次統計量は一定である騒音レベル変動現象が長時間で示す騒音レベル分布関数の表現に関する理論的考察を行った後、本理論的考察の正当性を実測データに適用して検証する。次いで、本考察対象を特徴づけている平均レベル変動パターンに関する詳細な情報が与えられなくとも、近似的な変動パターンが分かれば目的とする長時間で示す騒音レベル変動分布形状が推定可能であることを実験的に考察する。このような変動パターンの近似化に関する考察は、実用的レベル分布予測手法を考察する上で重要である。

3.1.2 騒音レベル変動のモデル化と確率密度関数表現（表現法1）

信号機の周期的点滅の影響を受けた騒音が、どのような変動形態を示すかに関する実態調査を実施し、得られた信号一周期内 $[0, T]$ （周期 T ）での騒音レベルの散布図（第2章図2.1.2, 図2.2.4, 図2.1.6 参照）から共通に次の2点が既に明かとなっている（§2.1.5 実測調査のまとめ参照）。

- (1) 騒音レベルの平均的変動パターンは各測定点ごとにその付近での信号機に制御された信号一周期内での車両の流れの様子を窺わせる固有な変動パターンを示す。
- (2) 騒音レベルの散布状況は、信号一周期内 $[0, T]$ の任意の時点 t で平均値に対してほぼ上下対称にデータが散布しており、その散布幅に関しても各時点でそれほど大差は見られない。

本節ではこのような騒音レベル変動現象が長時間（時区間 $[0, T]$ の全時区間）で示すレベル分布関数表現を考察する。目的とする確率密度関数 $p(l)$ は $[0, T]$ 内のランダム観測時刻 t における確率密度関数 $p(l|t)$ を用いて

$$p(L) = \int_0^T p(L, t) dt = \int_0^T p(L|t) p(t) dt, \quad p(t) = 1/T \quad (3.1.1)$$

で与えられる。ここで $p(L|t)$ は上記知見(1), (2)に基づき第一近似的には

$$p(L|t) = \frac{1}{(2\pi)^{0.5} \sigma_L} \exp[-(L - \mu_L(t))^2 / 2\sigma_L^2] \quad (3.1.2)$$

$$(\triangleq g(L; \mu_L(t), \sigma_L^2))$$

のごとく平均 $\mu_L(t)$, 分散 σ_L^2 (一定) のガウス分布に設定してもよからう。また, $\mu_L(t)$ は, その周期性に着目して, 次のフーリエ級数表示で与えることができる。

$$\mu_L(t) = \mu_{L0} + \sum_{n=1}^M (a_n \cos(2\pi/T \cdot nt) + b_n \sin(2\pi/T \cdot nt)) \quad (3.1.3)$$

$$= \mu_{L0} + \mu_{L1}(t)$$

(3.1.2)式の指数関数部分を

$$\begin{aligned} \exp[-(L - \mu_{L0} - \mu_{L1}(t))^2 / 2\sigma_L^2] &= \exp[-(L - \mu_{L0})^2 / 2\sigma_L^2] \\ &\cdot \exp[-(L - \mu_{L0})/\sigma_L \cdot \mu_{L1}(t)/\sigma_L - \mu_{L1}(t)^2 / 2\sigma_L^2] \end{aligned} \quad (3.1.4)$$

のように変形し, エルミート多項式の母関数に関する公式³⁾:

$$\exp(\xi x - \xi^2/2) = \sum_{n=1}^{\infty} \xi^n / n! \cdot H_n(x) \quad (3.1.5)$$

を用いると (3.1.1) 式は直ちに次のようになる⁴⁾。

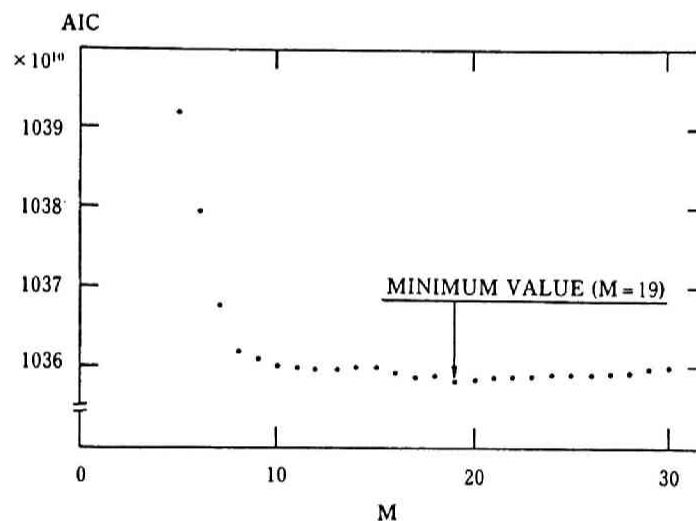
$$p(L) = g(L; \mu_{L0}, \sigma_L^2) \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot H_n((L - \mu_{L0})/\sigma_L) \right] \quad (3.1.6)$$

ここに

$$A_m \triangleq 1/(M! \sigma_L^m) \cdot 1/T \cdot \int_0^T [\mu_L(t) - \mu_{L0}]^m dt \quad (3.1.7)$$

である。(3.1.6) 式から次のことがわかる。即ち、平均値が任意の変動形態で周期的に変動する騒音レベルの確率密度関数は、平均値が変動しない定常不規則騒音だと見なしたときのレベル分布が初項に位置する級数展開型表示で与えられる。信号機の存在に基づくレベル変動の非定常性が、全体の分布形状に及ぼす影響は第2項以降の各展開係数の内に反映されている。

3.1.3 実測データによる実験的確認

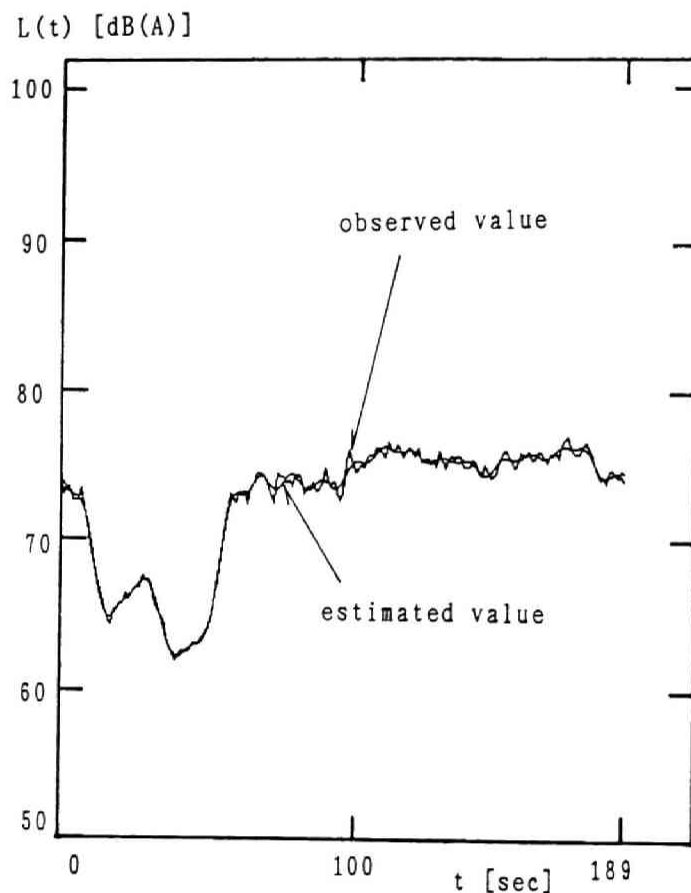


第 3.1.1 図 AIC による展開項数 M の決定

特に、§ 2.1.3 (幹線道路沿いの信号機間における道路騒音) の実測調査データに適用して、本分布表現手法の正当性を確認する。(3.1.6) 式を具体化するためには、まず σ_L や $\mu_L(t)$ (具体的には (3.1.3) 式の μ_{L0} , M , a_n , b_n ($n=1, 2, \dots, M$)) を推定する必要がある。そのための手法はほかにも考えられようが、ここでは AIC⁶⁾ による推定法を採用することとした。即ち、上記のパラメータ数やその値を求める評価基準として公知の AIC を導入し、これを最小にするものを最適推定値として採用する。項数 M ((3.1.3) 式参照) の各値に対

する AIC を計算し、それらをプロットしたのが図3.1.1 である。AIC が最小値となる $n=19$ を採用し、このときの σ_L , μ_{L_0} 及び A_n ($n=1, 2, 3, 4$) (AIC によって a_n, b_n ($n=1, 2, \dots, 19$)) を推定し、これを(3.1.7)式に代入することによって求められる) に対する推定値を示せば次のとおりである。

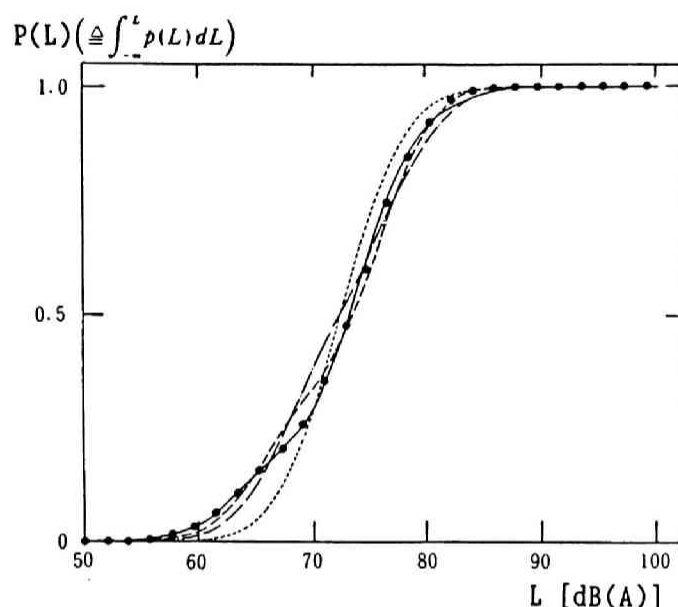
$$\hat{\sigma}_L = 4.60, \quad \hat{\mu}_{L_0} = 72.5, \quad \hat{A}_1 = 0.0, \quad \hat{A}_2 = 0.441, \quad \hat{A}_3 = -0.166, \quad \hat{A}_4 = 0.095 \quad (3.1.8)$$



第 3.1.2 図 $\mu_L(t)$ に対する推定値と実測値との比較

図3.1.2 は $\mu_L(t)$ に対する推定値と実測値との比較を示したものであるが、ごく微細な部分を除いて、両者は十分な一致性を示している。図3.1.3 は(3.1.8)式の数値を用いて描いた騒音レベル分布に対する理論的推定曲線と実験値との比較を行ったものである。道路騒音に対する評価量 L_{50} と直結している累積分布の形で示した。図中の理論曲線のうち、展開項初項の曲線は非定常道路騒音を定常騒音だと見なした場合の分布推定曲線に相当しており(3.1.6)式参照)、初めから定常騒音として扱うのであればかなりの推定誤差を

覚悟せねばならぬことを示している。この誤差は、交通流状態によって $\mu_L(t)$ の変化幅が大となるとますます大きくなり、従って $\mu_L(t)$ の変化をまじめに解析の中に取り入れることの必要性が窺われる。



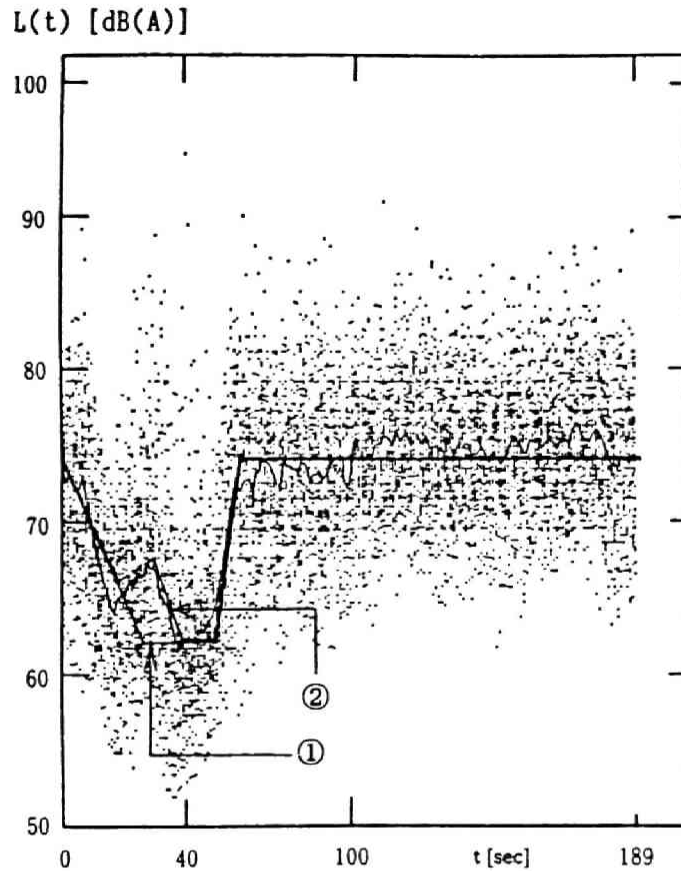
第 3.1.3 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較

((●) ; 実験値, 理論的曲線: [..... ; 初項($m=0$), - - - - - ;
第一項近似曲線($m=2$), - · - · - ; 第二項近似曲線($m=3$), ————
; 第三項近似曲線($m=4$)])

3.1.4 理論的推定手法の実用化に関する試み

(3.1.7) 式から, A_m ($m=1, 2, \dots$) を求めて (3.1.6) 式を具体化するにあたって, 特に次のことに留意することは有効である。すなわち, A_m を求めるには $\mu_L(t)$ の時間的変動パターンそのものが必ずしも必要ではなく, $[\mu_L(t) - \mu_{L_0}]^m$ に関する積分値を知れば十分である。換言すれば, $\mu_L(t)$ の微細な差がそのまま分布形状に敏感に影響するものではない。 $\mu_L(t)$ の変動パターンを思い切って単純化することが可能となれば, $\mu_L(t)$ の大略的な変動パターンを何らかの入力情報から予測することにより騒音レベル変動分布の予測が可能となり, 本手法の実用的有効性が獲得できよう。

上記の立場から, ここでは図 3.1.4 の①及び②のように単純化した場合を考察し, このときの各変動パターンに対するパラメータの値を示すとそれぞれ次のようになる。



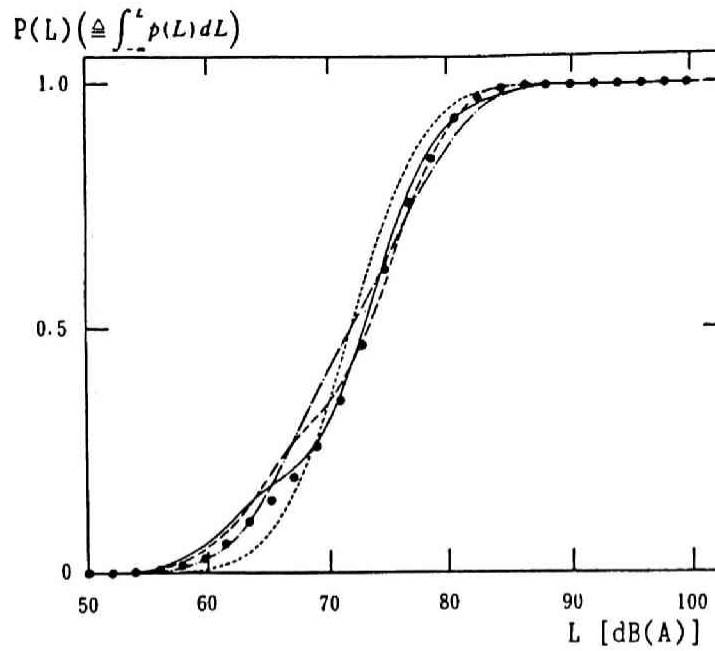
第 3.1.4 図 $\mu_L(t)$ に対する近似化パターン

$$\hat{\sigma}_L = 4.98, \quad \hat{\mu}_{L_0} = 71.9, \quad \hat{A}_1 = 0.0, \quad \hat{A}_2 = 0.426, \quad \hat{A}_3 = -0.187, \quad \hat{A}_4 = 0.100 \quad (3.1.9)$$

$$\hat{\sigma}_L = 4.59, \quad \hat{\mu}_{L_0} = 72.5, \quad \hat{A}_1 = 0.0, \quad \hat{A}_2 = 0.411, \quad \hat{A}_3 = -0.166, \quad \hat{A}_4 = 0.095 \quad (3.1.10)$$

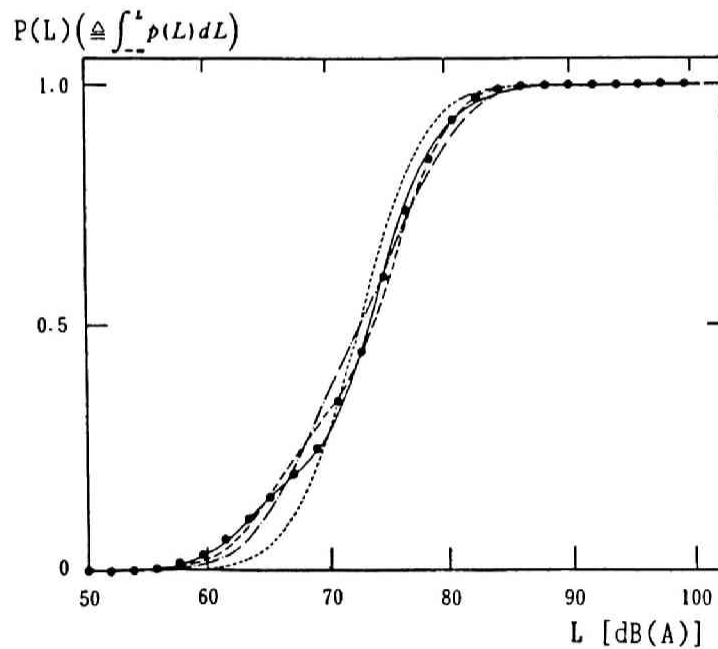
図3.1.5, 図3.1.6 はそれぞれ(3.1.9), (3.1.10) 式の値を用いて描いた理論的分布曲線と実験値との比較を示したものである。②の近似化パターンの場合はもちろん, ①のようなかなり粗い近似を行った場合にも理論的曲線は実験値を大略捉えており, このことは $\mu_L(t)$ に対して思い切った近似化の可能なことを物語っている。

以上の考察は近似化パターンを用いているが, 図3.1.4 に示した46周期にわたるすべての実測データに基づいている。道路騒音を簡易に予測する立場から, ここでは信号一周期分の実測データのみを用いて, 大胆に近似化パターンを推定した後, 長時間にわたるレベル分布を予測する実用的方法を考察する。



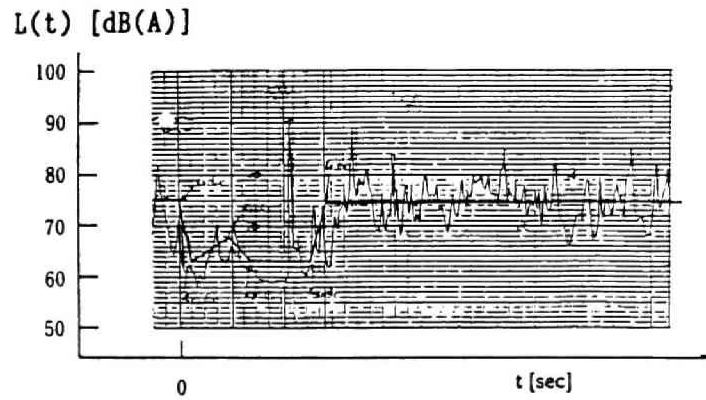
第 3.1.5 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較（近似化パターン①）

（（●）；実験値，理論的曲線：[..... ；初項(m=0)，----- ；
第一項近似曲線(m=2)，----- ；第二項近似曲線(m=3)，——— ；
第三項近似曲線(m=4)]）

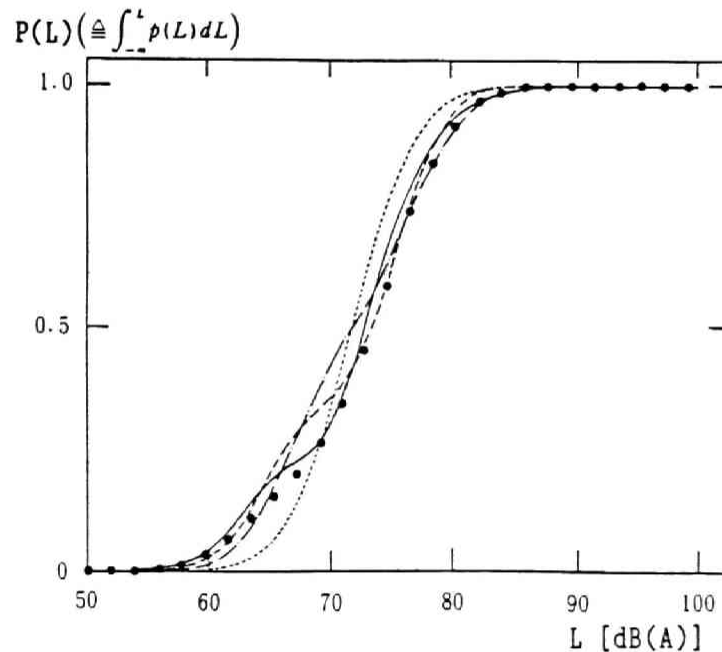


第 3.1.6 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較（近似化パターン②）

（（●）；実験値，理論的曲線：[..... ；初項(m=0)，----- ；
第一項近似曲線(m=2)，----- ；第二項近似曲線(m=3)，——— ；
第三項近似曲線(m=4)]）



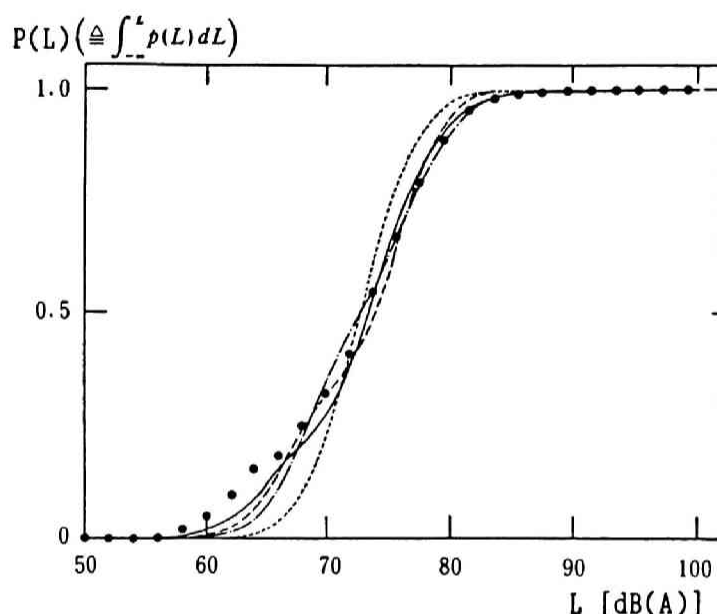
第 3.1.7 図 $\mu_L(t)$ に対する近似化パターン
(信号一周期の騒音レベル変動に基づく)



第 3.1.8 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較
((●) ; 実験値, 理論的曲線: [..... ; 初項($m=0$), - - - - - ;
第一項近似曲線($m=2$), - . - . - ; 第二項近似曲線($m=3$), ———
; 第三項近似曲線($m=4$)])

図3.1.7 は全く任意に選んだ信号一周期分のデータを取り上げ、これに対する $\mu_L(t)$ の近似化パターンを記入したものである。これによって得たパラメータを用いて長時間にわたるレベル分布を予測し、実測データとの比較を行ったものが図3.1.8 である。この実用的予測手法の有効性を調べるために、他の道路（国道185号線）における信号機付近で同様

の考察を行い，その結果を示したのが図3.1.9 である。これらのグラフからも理論の展開初項，即ち道路騒音変動を定常と見なした場合では大きな予測誤差を生じているが，騒音の非定常性を考慮した展開項を付加すると予測誤差が減少することが明らかに読み取れ，本近似化手法の有効性が確認される。



第 3.1.9 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較（国道 185 号線）

（（●）；実験値，理論的曲線：[..... ；初項(m=0)，- - - - - ；
第一項近似曲線(m=2)，——— ；第二項近似曲線(m=3)，———
；第三項近似曲線(m=4)]）

3.1.5 結言

本節では，信号機の影響を受けた道路騒音に対して，前章で得られた知見に基づき信号一周内で騒音レベルの平均値のみが周期的に変動し，2 次以上（分散等）の高次統計量は一定であるモデルを用いて，長時間で示す騒音レベル分布関数に対する理論的考察を行った。次いで，本考察の正当性を実測データに適用して確認した。また，この実験的検証結果より，1) 考察対象を定常的に扱うのであれば，推定レベル分布にかなりの誤差が生じる，2) 平均レベルの変動性を考慮することによってこの誤差を改善することが出来る，ことが明かとなり，考察対象を非定常的に扱う必要性が分かった。さらに，実用的有効性を獲得するために平均レベル変動パターンの近似化手法によるレベル分布推定手法を実験的

に考察し，その有効性を検証した。

高次統計量の周期的変動パターンまで考慮した一般的なモデルに関しては次節で考察する。

この節の引用文献

- 1) 加藤裕一, 山口静馬; “信号機による非定常道路交通騒音の一予測方法,” 日本音響学会誌, 44 (7), 510-514 (1988).
- 2) 加藤裕一, 山口静馬; “信号制御による非定常道路交通騒音の一予測方法,” 日本音響学会講演論文集, 489-490 (1987.10).
- 3) 吉田耕作, 雨宮綾夫, 伊藤 潔, 加藤敏夫, 松島興三, 古屋 茂; 応用数学便覧 (丸善, 東京, 1969), p. 397.
- 4) 太田光雄; “平均値動揺を伴った非定常不規則過程の Digital Simulation による統一的研究,” 電子通信学会論文誌 53-C (11), 870-878 (1970).
- 5) 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎; 情報量統計学 (共立出版, 東京, 1984), P. 42.

3. 2 高次レベル統計量の周期的変動特性¹⁾まで考慮した騒音レベル分布予測

3.2.1 緒言

3.1 節では、信号一周期以内での平均値レベルの変動のみを考慮し、2 次以上の高次レベル統計量は一定であるモデルを用いて、信号機の影響を受けた道路騒音が長時間で示すレベル分布の表現手法を考察した。しかしながら、第 2 章の実態調査から明らかなように、考察対象は周期的な繰り返し現象であり、平均レベルの変動程には顕著ではないかも知れないが、一般には高次統計量にも周期的変動性が存在すると考えられる。

本節では、このような高次レベル統計量までが周期的変動性を示す不規則変動現象の長時間で示すレベル変動分布を一般的に考察する。次いで、本理論的考察の正当性を実測データに適用して検証する。さらに、3.1 節での考察と同様に実用的近似化手法についても実験的に考察する。

3.2.2 周期的非定常レベル変動に対する一般的確率分布表現（表現法 2）

一般に不規則な変動現象が周期的に繰り返される確率過程は周期的非定常過程と呼ばれる²⁾。本考察対象である騒音レベル変動現象も信号機の周期的点滅に影響を受けた周期的非定常過程の一つと考えられる（第 2 章 § 2.1.5 参照）。本節ではこのような過程に従う騒音レベル変動現象が長時間で示す分布表現を一般的に考察する。

周期的非定常確率過程を記述する特性は確率分布が周期 T の移動に対して不変なことである。従って考察目的であるレベル分布の確率密度関数 $p(L)$ に対する特性関数 $\mu(\theta)$ は時区間 $[0, T]$ 内でのランダム観測時刻 t における確率密度関数 $p(L|t)$ を用いて、

$$\mu(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\theta \cdot L) p(L) dL = \int_0^T \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\phi \cdot L) p(L|t) dL \right] \cdot p(t) dt, \quad (3.2.1)$$

$$p(t) = 1/T, \quad \theta = i\phi$$

で与えられる。以下に、 $\varphi(\theta)$ に関する考察より $p(L)$ に対する一般的な表現式を導出する。

さて、(3.2.1)式の[]内は $p(L|t)$ に対する特性関数 $\varphi(\theta|t)$ である。そこで、 $p(L|t)$ のキュムラントベクトル $K(t)=[K_1(t), K_2(t), \dots]$ 、及び確率密度関数 $p_0(L)$ とそのキュムラントベクトル $K_0=[K_{10}, K_{20}, \dots]$ を導入すれば、 $\varphi(\theta|t)$ は次のように変形される。

$$\begin{aligned}
 \varphi(\theta|t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\theta \cdot L) p(L|t) dL \\
 &= \exp\left(\sum_{n=1}^{\infty} \theta^n K_n(t)/n!\right) \\
 &= \exp\left(\sum_{n=1}^{\infty} \theta^n K_{n0}/n!\right) \sum_{r=0}^{\infty} \theta^r / r! \cdot A_r(K(t), K_0) \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\theta \cdot L) \sum_{r=0}^{\infty} \theta^r / r! \cdot A_r(K(t), K_0) \cdot p_0(L) dL \quad (3.2.2)
 \end{aligned}$$

ここに展開係数 $A_r(K(t), K_0)$ は次式で与えられる。

$$A_r(K(t), K_0) = \left. \left(\partial / \partial \theta \right)^r \left[\exp \left(\sum_{n=1}^{\infty} [K_n(t) - K_{n0}] \theta^n / n! \right) \right] \right|_{\theta=0} \quad (3.2.3)$$

さらに、 $p_0(L)$ に関する次の自然な境界条件：

$$\left. \left(\partial / \partial L \right)^r p_0(L) \right|_{L=\pm\infty} \rightarrow 0, \quad (r=1, 2, \dots) \quad (3.2.4)$$

を用いると (3.2.2)式は

$$\varphi(\theta|t) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} (-1)^r / r! \cdot A_r(K(t), K_0) \cdot \exp(\theta \cdot L) \left(\partial / \partial L \right)^r p_0(L) dL \quad (3.2.5)$$

と変形される。(3.2.5)式を(3.2.1)式に代入すれば次式を得る。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(\theta \cdot L) \left(p(L) - \sum_{r=0}^{\infty} (-1)^r / r! \cdot B_r(K_0) \cdot (\partial / \partial L)^r p_0(L) \right) dL = 0 \quad (3.2.6)$$

ここに

$$B_r(K_0) \triangleq 1/T \cdot \int_0^T A_r(K(t), K_0) dt \quad (3.2.7)$$

である。展開係数 $B_r(K_0)$ の初めの数項を示せば次のとおりである。

$$\begin{aligned} B_0(K_0) &= 1, & B_1(K_0) &= 1/T \cdot \int_0^T [K_1(t) - K_{10}] dt, \\ B_2(K_0) &= 1/T \cdot \int_0^T \{ K_2(t) - K_{20} + [K_1(t) - K_{10}]^2 \} dt, \\ B_3(K_0) &= 1/T \cdot \int_0^T \{ K_3(t) - K_{30} + 3[K_2(t) - K_{20}][K_1(t) - K_{10}] + [K_1(t) - K_{10}]^3 \} dt, \\ B_4(K_0) &= 1/T \cdot \int_0^T \{ K_4(t) - K_{40} + 4[K_3(t) - K_{30}][K_1(t) - K_{10}] + 3[K_2(t) - K_{20}]^2 \\ &\quad + 6[K_2(t) - K_{20}][K_1(t) - K_{10}]^2 + [K_1(t) - K_{10}]^4 \} dt, \dots \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

(3.2.6)式が任意の θ に対して成立するためには、次式が成立しなければならない^{3), 4)} :

$$p(L) = \sum_{r=0}^{\infty} (-1)^r / r! \cdot B_r(K_0) \cdot (\partial / \partial L)^r p_0(L) \quad (3.2.9)$$

上式から次のことが分かる。

- 1) 考察目的である $p(L)$ は、時間に対して不変な基準となる確率密度関数 $p_0(L)$ を基幹とする級数展開表現で与えられる。
- 2) 周期的非定常性は展開係数 $B_r(K_0)$ の中に反映されている ((3.2.7), (3.2.8)式参照)。
さて、(3.2.9)式は、周期的非定常過程が時区間 $[0, T]$ の全体にわたって示す変動分布を一般的に表現しているが、実道路騒音のレベル分布推定に適用するためには、 $p_0(L)$ 及び $B_r(K_0)$ を具体化する必要がある。そこで、第2章での実測調査結果より、 $p_0(L)$ として次

のガウス分布:

$$p_0(L) = 1/(2\pi K_{20})^{1/2} \cdot \exp[-(L-K_{10})^2/2K_{20}] \quad (3.2.10)$$

$$(\triangleq g(L; K_{10}, K_{20}), K_0 = [K_{10}, K_{20}])$$

を採用し, $K(t)$ として 2 次キュムラントまで ($K(t) = [K_1(t), K_2(t)]$) を考慮することは自然であろう。このとき (3.2.9) 式は具体化され,

$$p(L) = g(L; K_{10}, K_{20}) \left[1 + \sum_{r=1}^{\infty} 1/(r! K_{20}^{r/2}) \cdot B_r(K_0) \cdot H_r((L-K_{10})/K_{20}^{1/2}) \right] \quad (3.2.11)$$

となる⁵⁾。ここに正規分布と n 次エルミート多項式の関係:

$$g(L; 0, 1) \cdot H_n(L) = (-1)^n g^{(n)}(L; 0, 1) \quad (3.2.12)$$

を用いている。(3.2.11) 式の展開係数は (3.2.8) 式の 3 次以上の高次キュムラントを 0 と置くことにより

$$B_0(K_0) = 1, \quad B_1(K_0) = 1/T \cdot \int_0^T [K_1(t) - K_{10}] dt, \\ B_2(K_0) = 1/T \cdot \int_0^T \{ K_2(t) - K_{20} + [K_1(t) - K_{10}]^2 \} dt, \quad (3.2.13)$$

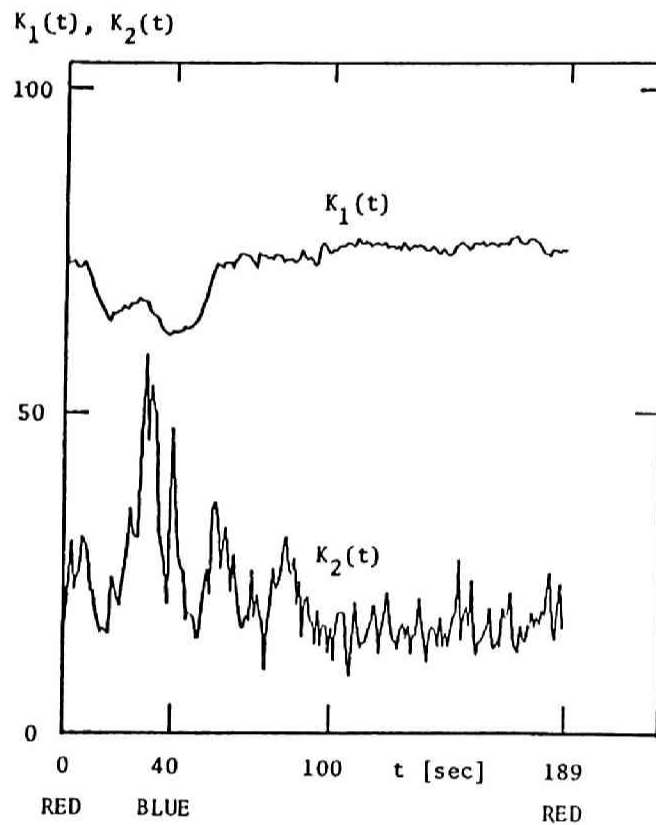
$$B_3(K_0) = 1/T \cdot \int_0^T \{ 3[K_2(t) - K_{20}][K_1(t) - K_{10}] + [K_1(t) - K_{10}]^3 \} dt, \\ B_4(K_0) = 1/T \cdot \int_0^T \{ 3[K_2(t) - K_{20}]^2 + 6[K_2(t) - K_{20}][K_1(t) - K_{10}]^2 + [K_1(t) - K_{10}]^4 \} dt, \dots$$

となる。さらに, (3.2.11) 式の級数展開型確率密度関数の収束性を改善する目的から, $B_1(K_0) = B_2(K_0) = 0$ となるようキュムラント K_{10}, K_{20} をそれぞれ定めれば,

$$K_{10} = 1/T \cdot \int_0^T K_1(t) dt, \quad K_{20} = 1/T \cdot \int_0^T \{ K_2(t) + [K_1(t) - K_{10}]^2 \} dt \quad (3.2.14)$$

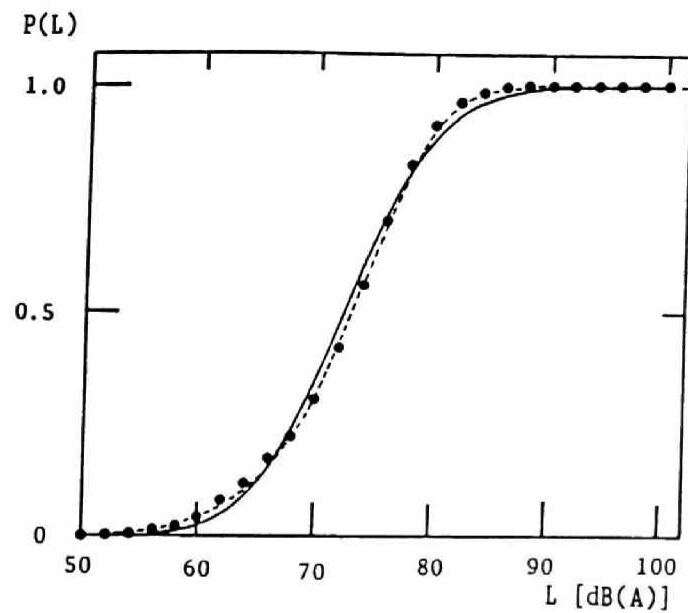
となる。

3.2.3 実測データによる実験的確認



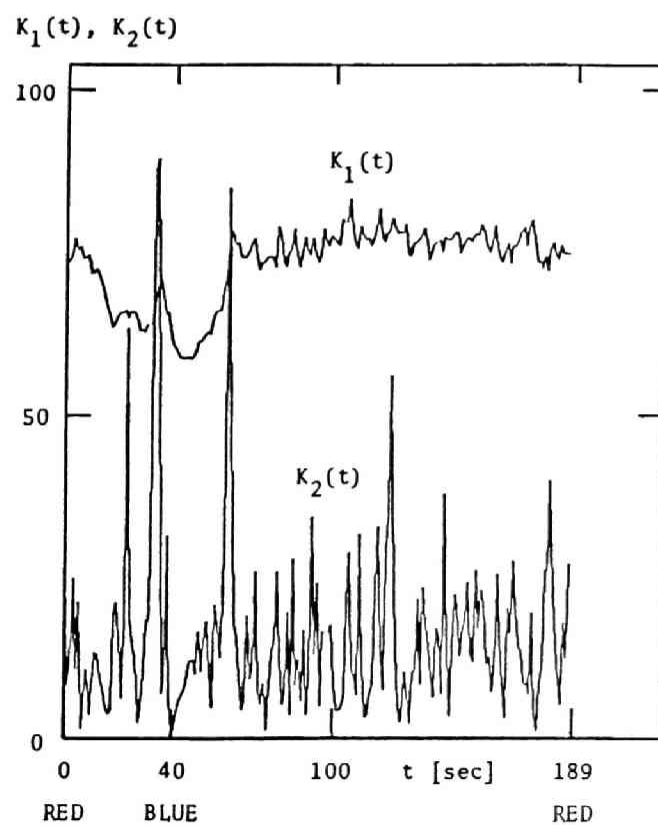
第 3.2.1 図 騒音レベルキュムラントの変動パターン
(46 周期の実測データに基づく)

理論的考察の正当性を実測データに適用して確認する。図3.2.1 は § 2.1.3 (幹線道路沿いの信号機間における実測調査) での道路騒音のレベルキュムラント $K_1(t)$ (平均), 及び $K_2(t)$ (分散) の変動パターンを示したものである (46 周期分のデータより算定した)。(3.2.13) 式及び (3.2.14) 式より K_{10} , K_{20} , $B_3(K_0)$, 及び $B_4(K_0)$ を推定すれば次のとおりである。



第 3.2.2 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較

(●) ; 実験値, 理論的曲線: [— ; 初項($r=0$), - - - ; 第一項近似曲線($r=3$)]

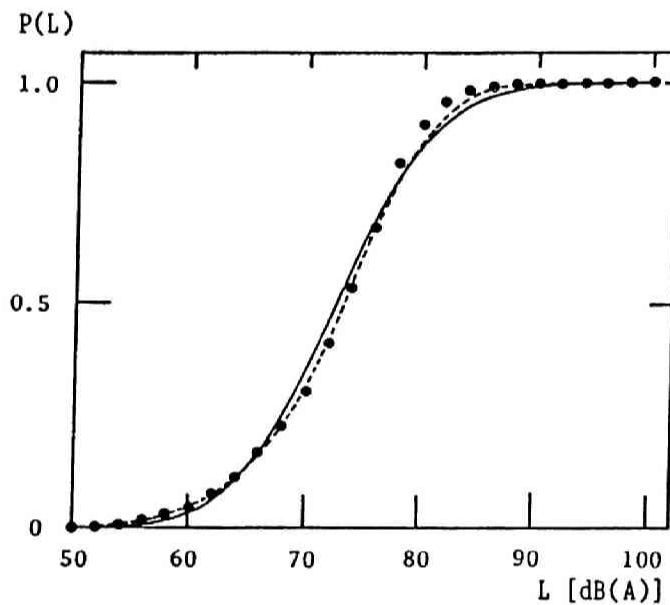


第 3.2.3 図 騒音レベルキュムラントの変動パターン

(初めの 5 周期の実測データに基づく)

$$\hat{\kappa}_{10}=72.5, \quad \hat{\kappa}_{20}=39.7, \quad \hat{\beta}_3(K_0)=-0.102, \quad \hat{\beta}_4(K_0)=0.0160 \quad (3.2.15)$$

図3.2.2 は(3.2.15)式の数値を用いて描いた騒音レベル分布に対する理論的推定曲線と実験値とを累積分布で比較したものである。展開項初項のみで近似した場合、少し実験値との誤差が見られるが、展開項を1項($\beta_3(K_0)$)付加すれば十分実験値を捉えていることが分かる。但し、展開項を第2項で近似($\beta_3(K_0)$ 、及び $\beta_4(K_0)$ まで考慮)した場合は、第1項近似した場合とほぼ一致しており、同図中には第1項近似曲線のみ示した。



第 3.2.4 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較

(●) ; 実験値, 理論的曲線: [——— ; 初項($r=0$), - - - - - ;
第一項近似曲線($r=3$)]

さらに、3.1節で考察した図3.1.3 (平均値レベルの変動パターンのみ考慮し2次以上の統計量に関する変動は考慮せず一定とした場合は、第3項(A_4)で近似して収束している)と比較して、本手法は全体的に展開型分布曲線の収束性の改善が明らかに見られる。よって本理論的考察の正当性、並びに高次レベル統計量の変動パターン(本実験的考察では2次統計量)まで考慮したことの一つの有効性を窺うことが出来よう。

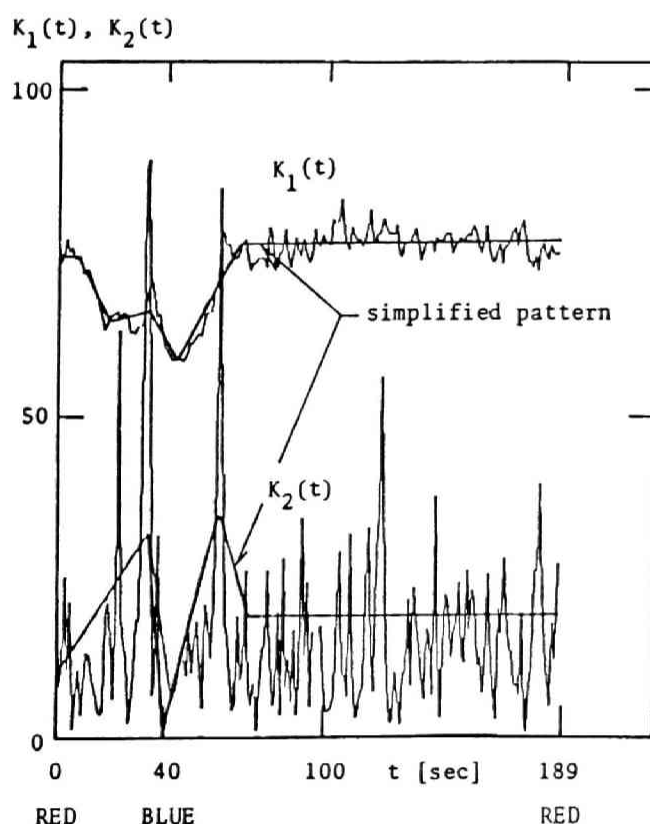
次に、小数データより分布推定することを考察する。図3.2.3 は46周期分の観測データのうち、始めの5周期分の観測データによる $\kappa_1(t)$ 、及び $\kappa_2(t)$ の変動パターンを示したものである。小数データのために図3.2.1と比較して、特に $\kappa_2(t)$ がかなり変動している。

この変動パターンに対する各パラメータを推定すれば次のようになる。

$$\hat{f}_{10}=72.5, \quad \hat{f}_{20}=46.8, \quad \hat{\beta}_3(K_0)=-0.0916, \quad \hat{\beta}_4(K_0)=0.858 \times 10^{-2} \quad (3.2.16)$$

(3.2.16)式の値を用いて描いた理論的推定曲線と実験値との比較を示したものが図3.2.4である。5周期程度的小数データからでも十分推定が可能であることが分かる。

3.2.4 変動パターンの単純化に基づく推定手法の実用化



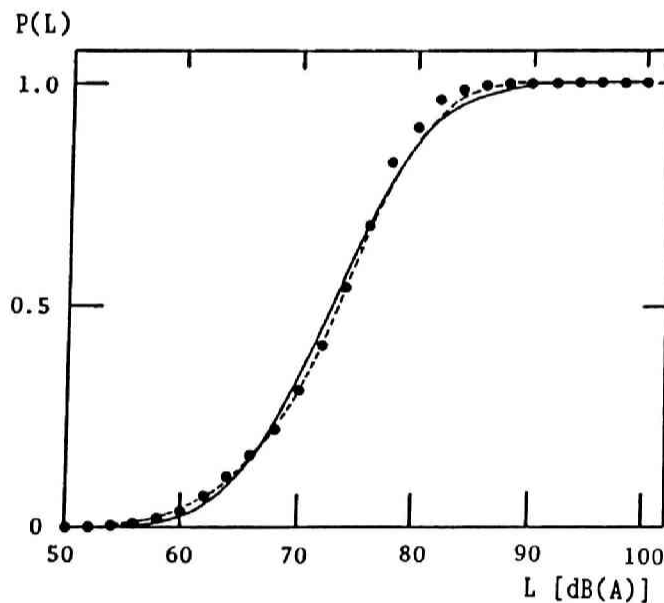
第 3.2.5 図 騒音レベルキュムラントの近似化パターン
(初めの5周期の実測データに基づく)

§ 3.1.4 における考察と同様に、何らかの入力情報に基づき各騒音レベル統計量の変動パターンを推定し騒音レベル分布の予測を試みる上で、予め単純化された騒音レベル統計量の変動パターンを用いて、分布推定の可能性について調べておくことは重要である。図 3.2.5 は図3.2.3 で示した $f_1(t)$ 、及び $f_2(t)$ の変動パターンに基づく近似化変動パター

ンを示したものであり、この近似化変動パターンに対する各パラメータを示せば次のようになる。

$$\hat{K}_{10}=72.8, \hat{K}_{20}=45.8, \hat{\beta}_3(K_0)=-0.0999, \hat{\beta}_4(K_0)=0.298 \times 10^{-3} \quad (3.2.17)$$

(3.2.17) 式の値を用いて描いた理論的曲線と実験値との比較を示したものが図3.2.6である。図3.2.5 に示した大略的な近似化を行っても、かなりよく実験値をよく捉えていることが分かる。従って、騒音レベル分布予測に関する入力情報は、この程度（図3.2.5 あるいは § 3.1.4 での考察）の騒音レベル統計量の変動パターンが推定出来ればよいことが分かり、新たな予測手法や実用化手法を提案するための一つの指針を与えることが出来よう。



第 3.2.6 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較

((●) ; 実験値, 理論的曲線:[——— ; 初項($r=0$), ;
第一項近似曲線($r=3$)])

3.2.5 結言

本節では、3.1節で行った信号機の点滅により影響を受けた騒音レベル変動の、長時間にわたるレベル分布に関する考察をさらに発展させ、信号一周期内の平均的レベル変動パターンのみならず、高次統計量の変動パターンまで考慮した一般的な展開型の騒音レベル分

布表現を理論的に導出した。特に2次キュムラント量までの変動パターンを考慮したレベル分布推定手法を実験的に考察し、理論的考察の正当性を確認した。また、この実験的考察から、高次キュムラントの変動まで考慮すれば、3.1節で考察したレベル分布表現と比較して、分布関数の収束性を改善出来ることが分かり、高次統計量までの周期的変動性を考慮することの有効性が分かった。さらに、レベル統計量変動パターンの単純化手法による分布推定手法も実験的に考察を行い、その有効性を確認した。

この節の引用文献

- 1) S.Yamaguchi and Y.Kato; "A practical method of predicting noise produced by road traffic controlled by traffic signals," J.Acoust.Soc.Am. 86(6), 2206-2214 (1989).
- 2) 小倉久直; "物理・工学のための確率過程論," (コロナ社, 東京, 1978) p.151
- 3) 太田光雄, 山口静馬, 広光清次郎; "騒音環境システムの多変量状態確率表現とその線形推移に関する統一的一考察," 電子通信学会論文誌, 60-A(9), 844-851 (1977).
- 4) A.Ikuta, S.Yamaguchi and M.Ohta; "A statistical consideration of nonstationary random noise and vibration in view of temporal change of cumulants and its application to dynamical prediction of L_x ," J. Sound Vib. 72(2), 267-272 (1980).
- 5) 太田光雄; "ガウス形不規則過程の非定常理論とそのデジタルシミュレーション," 電子通信学会論文誌, 54-C(10), 885-892 (1971).

第4章 信号機周辺の交通流観測に基づく 道路騒音レベル分布の予測

第3章では、本考察対象の特徴である周期的繰り返し現象がレベル統計量の変動パターンに顕著に現れることに着目して、信号機の影響を受けた道路騒音レベル変動が長時間で示す騒音レベル分布を見出し、その正当性を実験的にも確認した。また、簡易なレベル分布の実用的予測手法に関しても考察した。

しかしながら、騒音対策を考える上では、結果的に得られた騒音レベル変動現象にのみに着目するのではなく、現象を引き起こす交通流に根ざして考察することが重要である。即ち、騒音評価量を予測してこれをある値以下に抑えるためにはどうすればよいかといった工学的目的を達成するためには、信号機が騒音発生源である車両をどのように制御し、さらにそれらの車両からどの程度の騒音が発生し、観測点に伝搬していくのかに関する考察を行う必要がある。

そこで上記問題点を解決する第一歩として、本章では、1)騒音レベル変動現象を把握するため、交通流状態を記述する具体的変量をどのように選べばよいのかを考察し、2)交通流状態とそれから発生した騒音のレベル統計量との基礎的な関係を見出し、3)上記1)、2)の考察に基づいて、観測された交通流から各騒音レベル統計量（特に平均と分散）の変動パターン及び騒音レベル分布を推定することを考える。4.1節では、実測データを用いて1)に関する考察を行った後、等間隔モデルや指数分布モデルに着目して平均的な交通流情報（正確には平均走行車両台数）と音の強さに関する統計量との回帰モデルを設定する。次いで、残る2)、3)の問題を§2.1.3での道路状況下で実験的に考察する。4.2節では、特に、§2.1.2での道路状況下で、4.1節での考察とは異なり、車両の出力音響パワーに関する考察結果を導入して計算機シミュレーションにより上記1)、2)、3)の問題を考察する。

尚、信号機の周期的点滅によって、どのような交通流状況が生じるのかについては第5章で詳しく考察する。

4. 1 平均走行車両台数の周期的変動に着目した分布予測^{1), 2)}

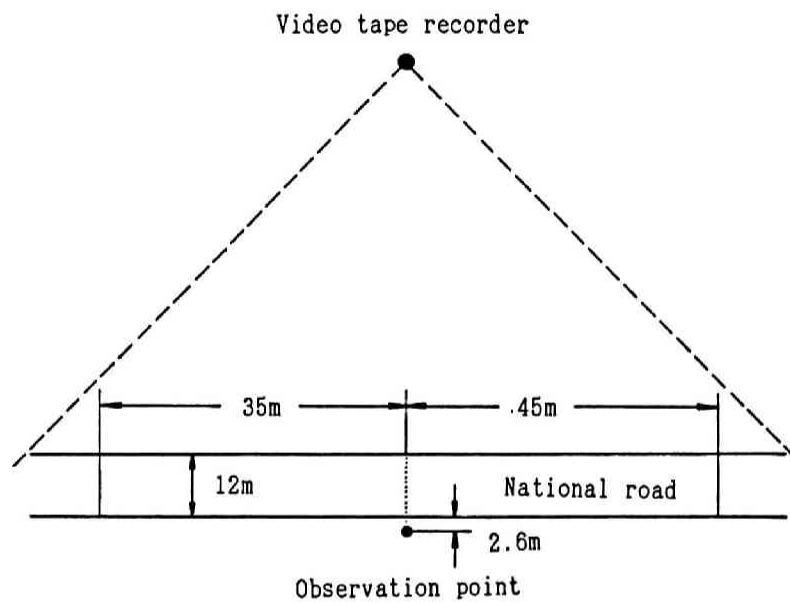
4.1.1 緒言

第3章では、結果的に得られた騒音レベル統計量の変動パターンに着目すれば、長時間での騒音レベル分布が表現可能であることを示したが、騒音評価量を予測し対策問題等を考察する上では、騒音発生源である交通流に立脚して考察することが重要である。そこで本節ではその第一歩として、騒音レベルと同時観測された交通流データを使用し、騒音レベル特に、平均、分散等のレベル統計量と交通流との関係を定量化した後、目的とするレベル分布を推定するために必要な各レベル統計量の時間的変動パターンを推定する。

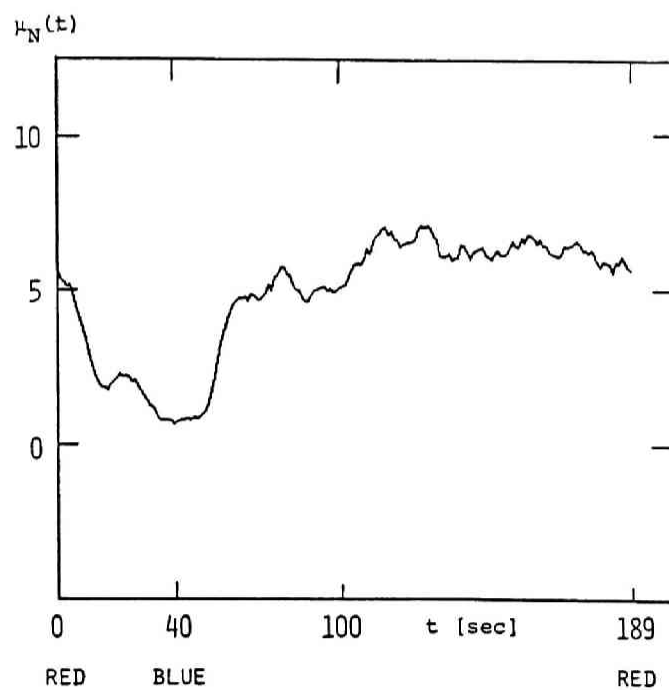
具体的には、第2章での実態調査において、平均レベル統計量の変動パターンから車両の流れを窺うことが出来ることに着目して、考察対象区間内での平均走行車両台数の信号一周期的変動パターンは、平均レベルのそれと相似な変動パターンを示すことを実測データを用いて明かにする。次いでこの実験的考察結果、並びに定常交通流での騒音予測方式としてよく知られている等間隔モデルや指数分布モデルの解析結果の中に、平均的交通量と音の強さに関する各統計量との間に回帰的關係が存在することに着目して、平均走行車両台数の変動パターンを用い、騒音レベル統計量（特に、平均、分散）の変動パターンを推定することを実験的に考察する。最後に、観測された平均走行車両台数の変動パターンを用いて、騒音レベルの平均、及び分散の変動パターンを推定した後、第3章で考察したレベル分布表現手法に帰着させて分布推定が可能となること示し、本考察の正当性を実験的に検証する。更に、平均走行車両台数の近似化パターンによる分布推定手法も実験的に考察する。

4.1.2 騒音レベル統計量と平均走行車両台数との関連性

交通流とその発生騒音との定量的関係を把握するためには、実際に交通流を観察し、どのような信号機の影響が現れるているのか調査することから始めるべきである。本節では、第2章で実施した交通流とその発生騒音を同時観測して得たデータを用いて、この定量的関係を考察する。

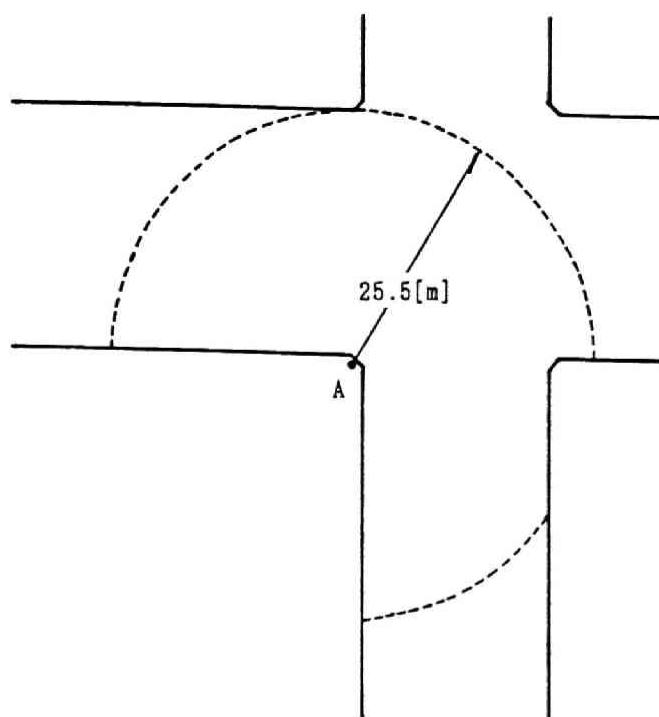


第 4.1.1 図 幹線道路での交通流観測状況

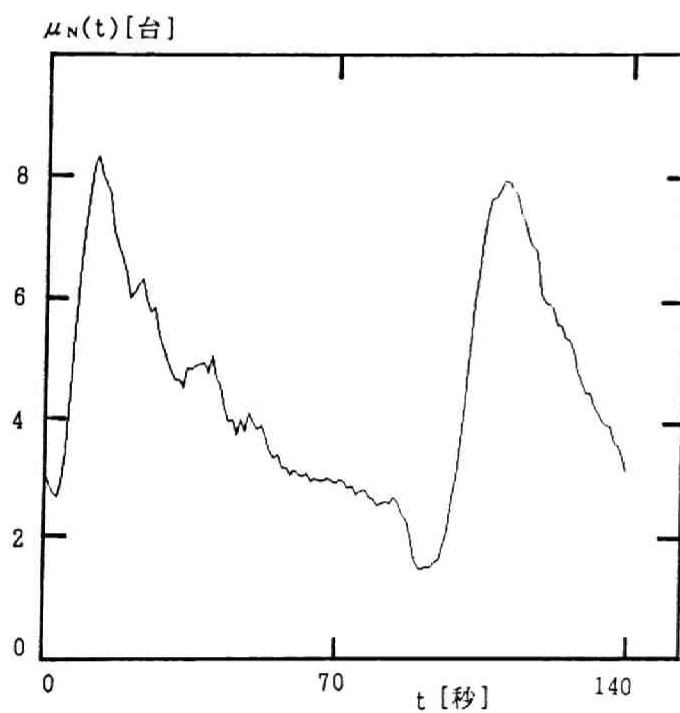


第 4.1.2 図 平均走行車両台数の変動パターン

(考察対象区間; [+57, -57 m], 46 周期観測した平均)



第 4.1.3 図 市街地交差点での交通流観測状態



第 4.1.4 図 平均走行車両台数の変動パターン

(考察対象区間;半径 25.5[m],58 周期観測した平均)

まず，観測点に支配的に騒音を及ぼすのは，騒音観測点付近の走行車両であり，停止車両による騒音は暗騒音に寄与していることから，騒音レベル変動現象に対する考察と同様，

交通流を代表するものとして、観測点近傍の平均的走行車両台数に着目して、信号機の点滅の影響を調査する。

図4.1.1 は既に § 2.1.3 で示した実態調査の交通流観測状況を示したものであり、このときの信号一周期内での平均走行車両台数（46周期観測した平均）の変動パターン $\mu_N(t)$ を示したものが図4.1.2 である。ビデオカメラによる撮影範囲([35, -45m])のデータを用いて、[57, -57m]に拡張して示している。57 なる値は、後の騒音レベル分布を考察するために、この点に大型車が1台存在する場合の騒音観測点への寄与を暗騒音の値と一致するように設定した。同様に、図4.1.3 は § 2.1.2 に示した実態調査状況であり、このとき観測点 A の半径 25.5[m] 内での $\mu_N(t)$ （58周期観測した平均）を示したものが図4.1.4 である。これらの $\mu_N(t)$ より次のことが分かる。

- 1) 何れの $\mu_N(t)$ にも信号機に制御された車両の流れの様子が明確に現れている。
- 2) § 2.1.3 及び § 2.1.2 で示した平均的レベル変動パターン $\mu_L(t)$ （図2.1.4 及び図2.1.2参照）とそれぞれ比較し、 $\mu_N(t)$ は何れも相似の変動パターンを示している。

上記実験的考察 1), 2) より平均的走行車両台数 μ_N を交通流を代表する一つの変数として選び、騒音レベル統計量との関係を論ずることの妥当性が改めて確認される。

一方、第1章で考察したごとく、定常的な交通流状態での騒音予測モデルにおいても、交通流を記述するパラメータと騒音の音の強さに関する統計量との解析的関係が知られている。以下に、その代表的モデルの解析結果のみ記す。

(a) 等間隔モデル³⁾：

$$\mu_1 = W/(4DS), \quad \sigma_1^2 = (W/4DS)^2 \cdot [\coth(2\pi D/S) - 1] \quad (4.1.1)$$

(b) 指数分布モデル^{4), 6)}：

$$K_{n1} = D\pi / S \cdot (2n-3)!! / (2n-2)!! \cdot (W/4\pi D^2)^n \quad (4.1.2)$$

特に、

$$K_{11} = \mu_1 = W/(4DS), \quad K_{21} = \sigma_1^2 = W^2 / (32\pi D^3 S) \quad (4.1.3)$$

である。ここに、上記(a)(b)のモデルは自由音場での一車線・一車種・等速交通流状態を仮定しており、 D :騒音観測点と道路までの距離、 δ :平均車頭間隔、 M :走行車両の音響パワー、 μ_L :観測点での音の強さの平均、 σ_L^2 :観測点での音の強さの分散、 X_{nL} :観測点での音の強さの n 次キュムラント、である。

モデル(a)(b)から音の強さに関する各統計量は、 $1/\delta$ 、即ち等速度で走行している平均車両密度にほぼ比例することが分かる。上記モデルは理想的状態での解析結果であるが、現実の道路状況においてもその大略的傾向は依然として存在していると考えられる。従って、観測点での音の強さの各統計量（キュムラント統計量）は平均走行車両台数 μ_N にほぼ比例していると考えられる。この考察の妥当性は上記考察 2) から窺うことが出来る（ $\mu_N(t)$ と $\mu_L(t)$ の関係であるが）。以上の考察より、一般に μ_N と X_{nL} の基本的関係として、次の回帰モデル：

$$X_{nL} = \alpha_n \mu_N \quad (n=1, 2, \dots) \quad (4.1.4)$$

を設定することが出来る。ここに α_n は道路状況によって定まる回帰係数である。

最後に、レベル統計量との関係について考察する。音の強さに関する統計量とレベル統計量との一般的関係は既に知られている⁶⁾。しかしながら第3章での考察のように2次（平均、分散）のレベル統計量の変動パターンまでを考慮し、正規性を仮定すれば十分である場合には、音の強さ是对数正規分布に従い、各レベル統計量の変動パターンは(4.1.4)式を用いて次式となる。

$$X_1(t) (= \mu_L(t)) = M \cdot \ln [(\alpha_1 \mu_N(t))^2 / (\alpha_2 \mu_N(t) + (\alpha_1 \mu_N(t))^2)^{1/2}] \quad (4.1.5)$$

$$X_2(t) (= \sigma_L^2(t)) = M^2 \cdot \ln [(\alpha_2 \mu_N(t) + (\alpha_1 \mu_N(t))^2) / (\alpha_1 \mu_N(t))^2]$$

$$(M \triangleq 10/\ln 10)$$

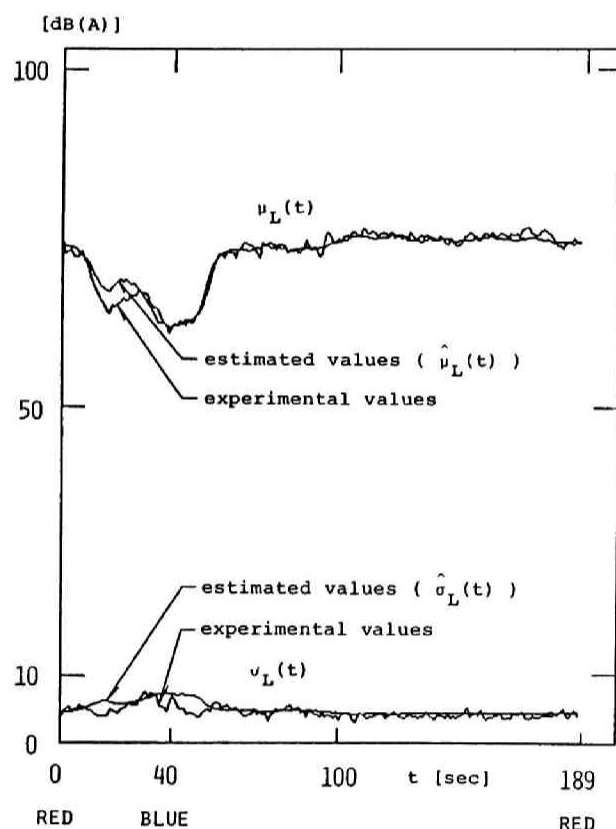
4.1.3 実測データによる実験的確認

§4.1.2 で考察した平均走行車両台数と音の強さに関する統計量との定量的関係、並び

に，平均走行車両台数の変動パターンに基づくレベル分布推定手法に関する考察の正当性を § 2.1.3 で示した実測データに適用して検証する。

実測レベルデータ $l(i, j)$ ($i=1, 2, \dots, 189$, $j=1, 2, \dots, 46$) (1秒ごとにサンプリングした46周期分のデータ) 及び平均走行車両台数 $\mu_N(i)$ ($i=1, 2, \dots, 189$) (46周期分の平均値を1秒ごとにサンプリングした) を用いて推定した回帰係数 α_1 , α_2 を示せばそれぞれ次のようになる。

$$\hat{\alpha}_1 = 0.880 \times 10^7, \quad \hat{\alpha}_2 = 0.870 \times 10^{15} \quad (4.1.6)$$



第 4.1.5 図 $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ に対する推定値と実測値との比較

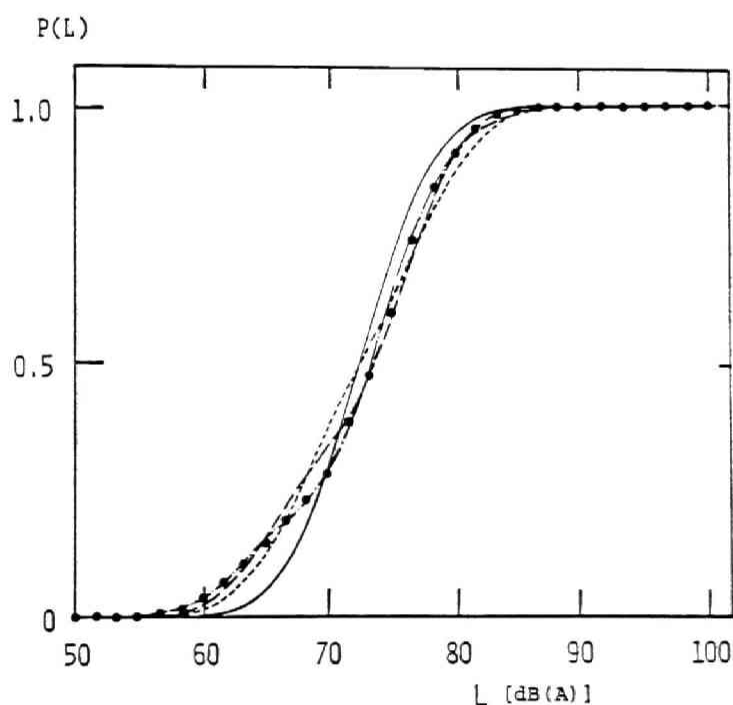
図4.1.5 は(4.1.6)式及び図4.1.2 に示す $\mu_N(t)$ の変動パターンを用いて(4.1.5)式に従い推定した $\mu_L(t)$ 及び $\sigma_L(t)$ の変動パターンを実測値と比較したものである。図4.1.6は図4.1.5に示す $\hat{\mu}_L(t)$, $\hat{\sigma}_L(t)$ を用いて § 3.1.2 で考察したレベル分布推定法(表現法1)に従い描いた理論的レベル分布曲線 ($P(L) \triangleq \int_{-\infty}^L p(L) dL$) を実測値と比較したものである。こ

ここに各パラメータは

$$\mu_{L0} = 1/T \cdot \int_0^T \hat{\mu}_L(t) dt = 72.55, \quad (T=189)$$

$$\sigma_{L^2} = 1/T \cdot \int_0^T \hat{\sigma}_L^2(t) dt = 25.74,$$

$A_1=0.0$, $A_2=0.317$, $A_3=-0.128$, $A_4=0.067$ である ((3.1.7)式参照)。



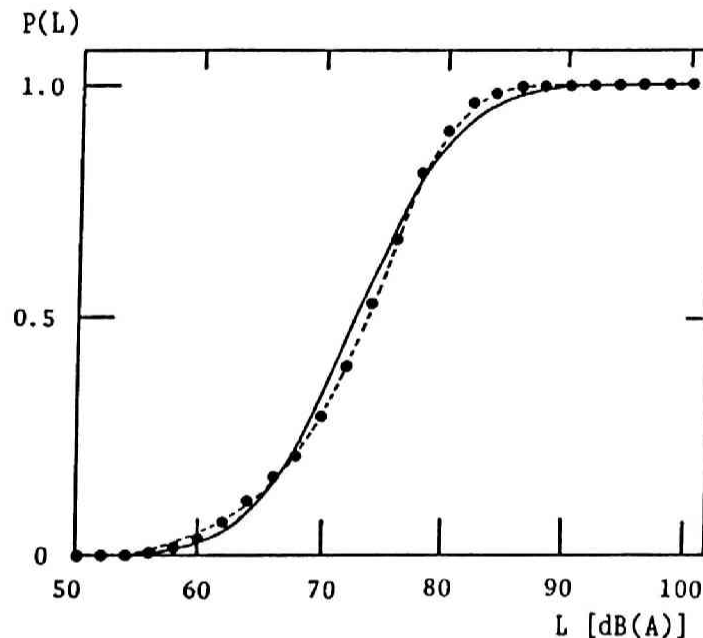
第 4.1.6 図 騒音レベル分布に対する理論 (表現法 1) と実験との比較

((●) ; 実測値, 理論的曲線: [——— ; 初項(m=0), ;
第一項近似曲線(m=2), ——— ; 第二項近似曲線(m=3), - - - - -
; 第三項近似曲線(m=4)])

同様に, 図 4.1.7 は図 4.1.5 に示す $\hat{\mu}_L(t)$, $\hat{\sigma}_L(t)$ を用いて, § 3.2.2 で考察したレベル分布推定法 (表現法 2) を用いて描いた理論的レベル分布曲線を実測値と比較したものである。但し, 展開項を第 2 項近似 ($b_3(K_0)$ 及び $b_4(K_0)$ まで考慮) した場合は, 第 1 項近似した場合とほぼ一致しており同図中には第 1 項近似曲線のみ示した。ここに各パラメータは

$$\hat{K}_{10}=72.6, \quad \hat{K}_{20}=41.4, \quad \hat{\beta}_3(K_0)=-0.132, \quad \hat{\beta}_4(K_0)=0.0474$$

である（(3.2.13)式及び(3.2.14)式参照）。



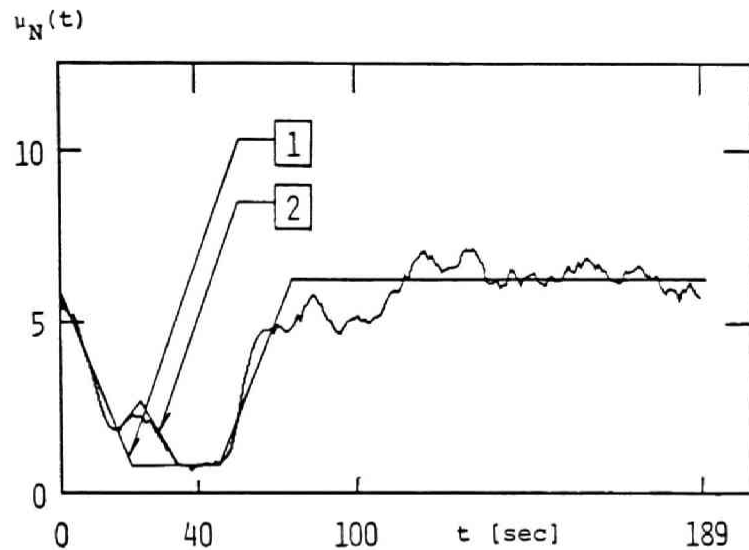
第 4.1.7 図 騒音レベル分布に対する理論（表現法 2）と実験との比較
 （（●）；実測値，理論的曲線：[———— ；初項($r=0$), ；
 第一項近似曲線($r=3$)]）

観測された $\mu_N(t)$ に基づき推定した $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ の変動パターン（図 4.1.5）は実測値の傾向を良く捉えていることが分かる。更に，第 3 章で考察したレベル分布推定法に帰着させて描いた分布曲線（図 4.1.6, 図 4.1.7 参照）も，何れも初項のみでは誤差が生ずるが，展開項を付加する，即ち非定常性を考慮することにより実測値を十分捉えていくことがわかり，本考察の正当性を窺うことが出来る。

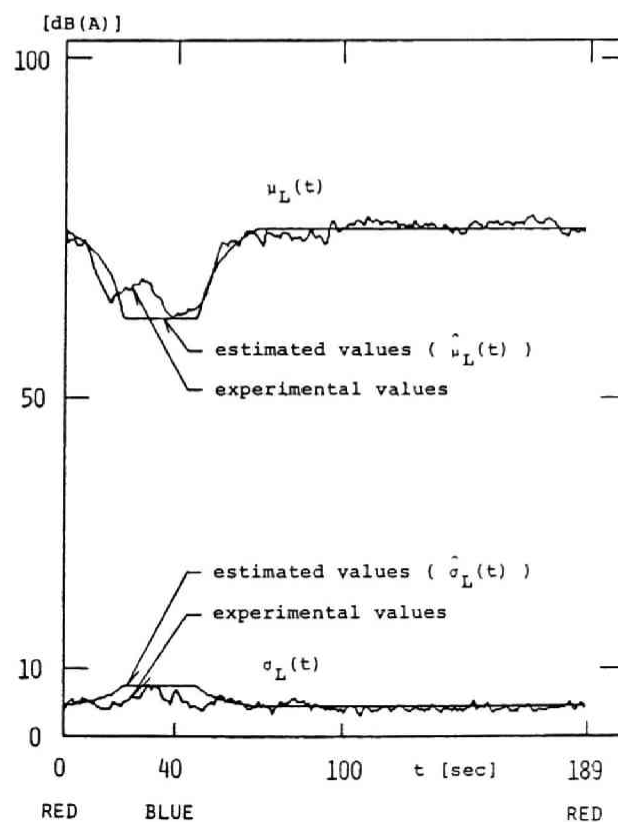
4.1.4 変動パターンの近似化に基づく推定手法の実用化

§ 3.1.4 及び § 3.2.4 で考察したごとく，目的とする長時間での騒音レベル分布を推定するのであれば，信号一周期内的でのレベル統計量（特に，平均及び分散）の大略的な変動パターンが分かればよいことを既に考察した。入手出来る情報より，どの程度このレベル

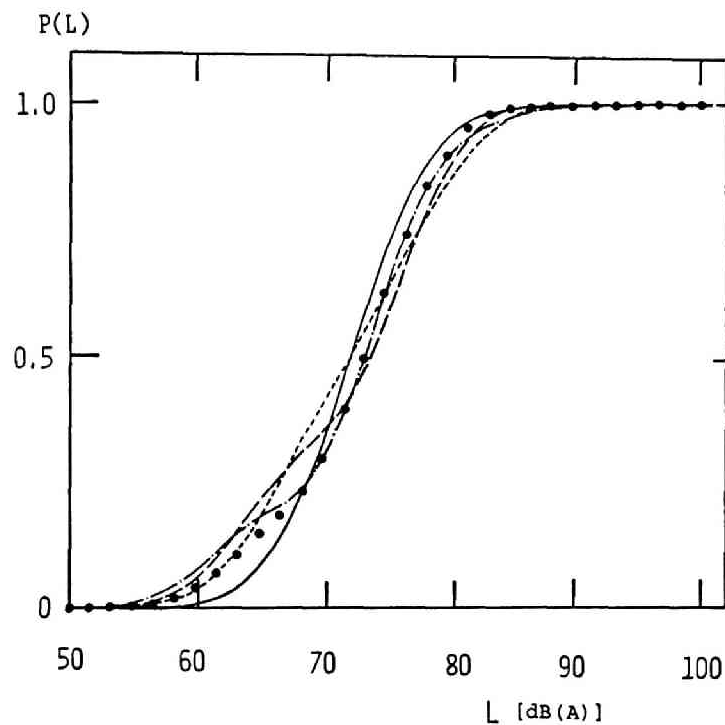
統計量の変動パターンを推定出来れば分布予測可能なのかに関する考察は、実用化を考える上で工学的に重要である。ここでは、 $\mu_N(t)$ の近似化パターンに基づくレベル分布推定法を考察する。



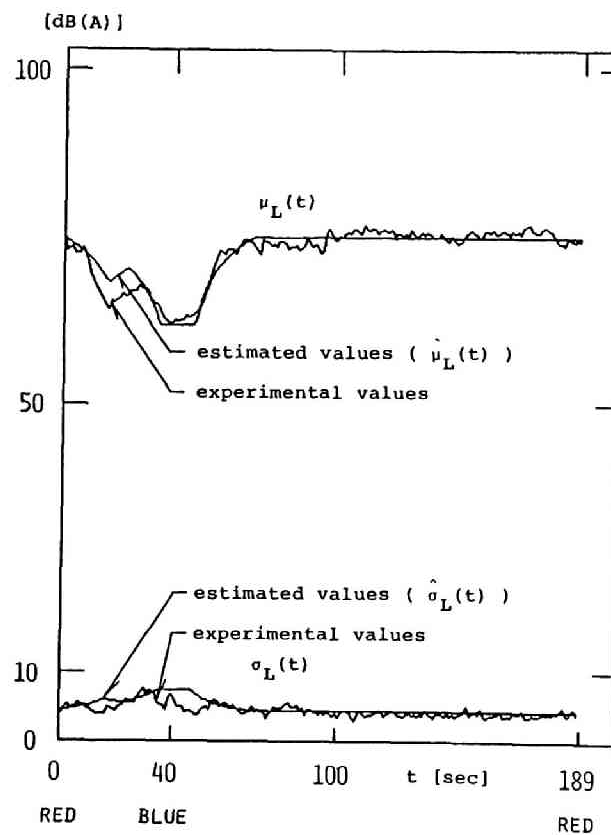
第 4.1.8 図 平均走行車両台数の近似化パターン
(46 周期の平均に基づく)



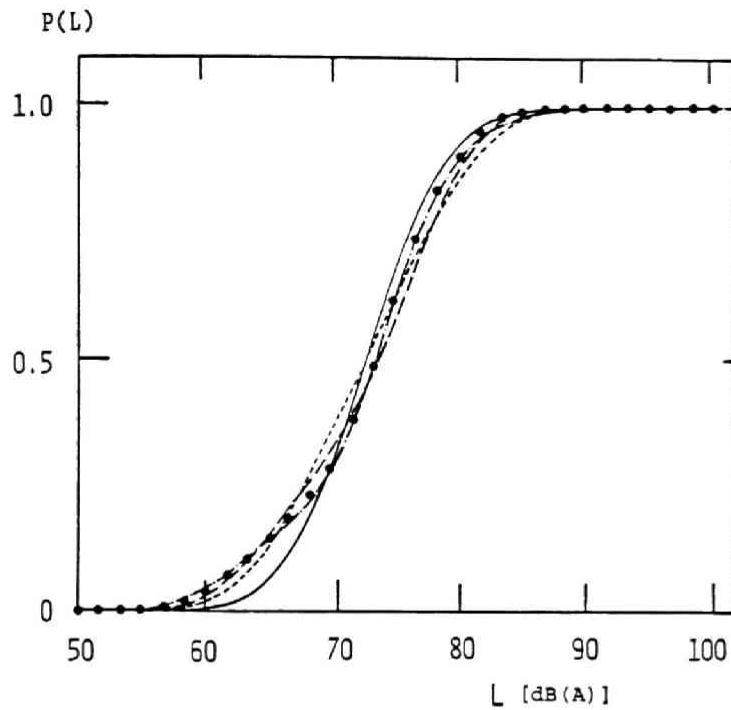
第 4.1.9 図 $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ に対する推定値 (近似化パターン 1 に基づく)
と実測値との比較



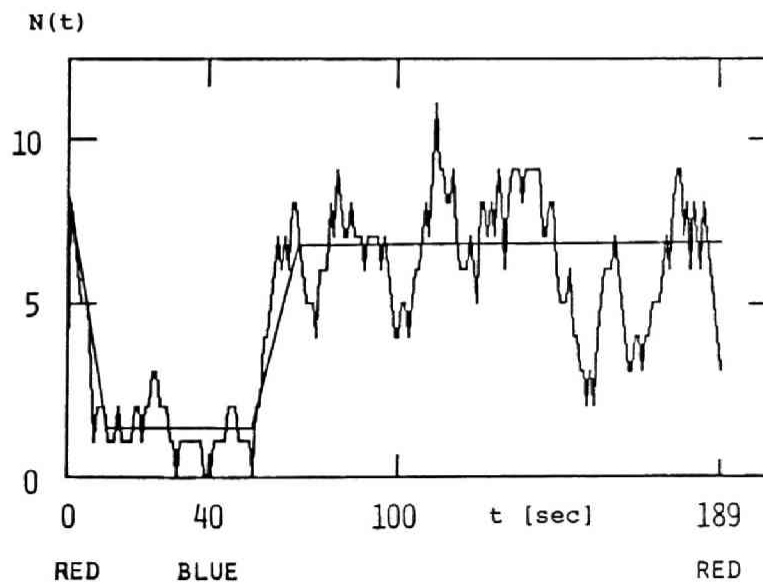
第 4.1.10 図 騒音レベル分布に対する理論（表現法 1）と実験との比較
 ((●) ; 実測値, 理論的曲線: [——— ; 初項($m=0$), ;
 第一項近似曲線($m=2$), - - - ; 第二項近似曲線($m=3$), - · - · -
 ; 第三項近似曲線($m=4$)])



第 4.1.11 図 $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ に対する推定値（近似化パターン 2 に基づく）
 と実測値との比較

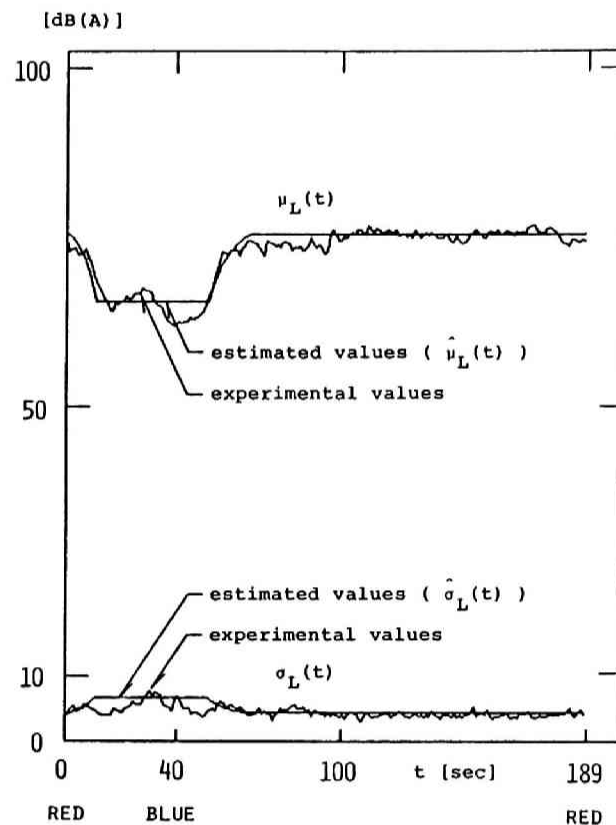


第 4.1.12 図 騒音レベル分布に対する理論（表現法 1）と実験との比較
 ((●) ; 実測値, 理論的曲線:[——— ; 初項($m=0$), ;
 第一項近似曲線($m=2$), ——— ; 第二項近似曲線($m=3$), - · - · -
 ; 第三項近似曲線($m=4$)])



第 4.1.13 図 平均走行車両台数の近似化パターン
 (信号一周期の観測データに基づく)

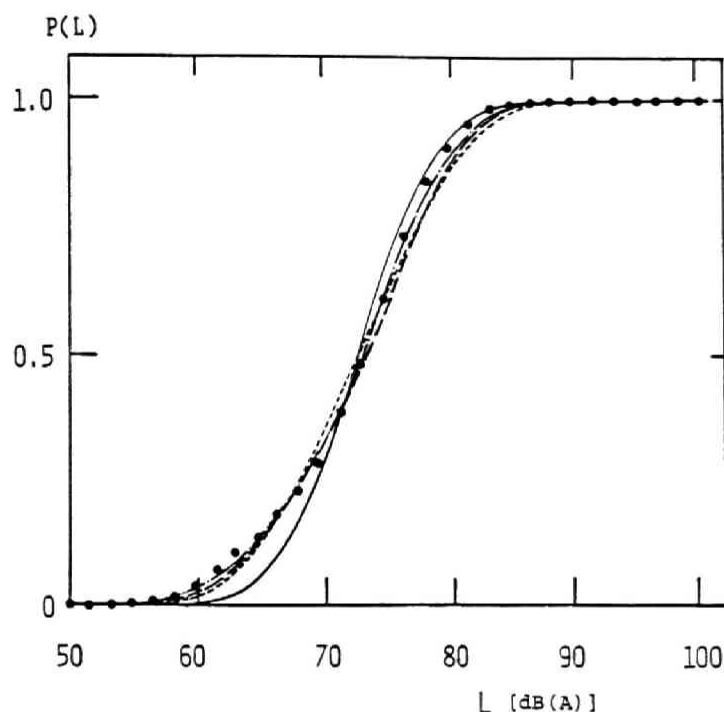
図4.1.8 は図4.1.2 で示した平均走行車両台数の変動パターン $\mu_n(t)$ (46周期の平均) に基づく近似化パターン1, 2を示したものである。近似化パターン1に基づき回帰係数 ((4.1.6) 式の値) 及び (4.1.4) 式を用いて推定した $\hat{\mu}_L(t)$, $\hat{\sigma}_L(t)$ を実測値とともに図4.1.9 に示す。更に, 分布表現法1 (§ 3.1.2 参照) に基づき推定したレベル分布曲線が図4.1.10 である。同様に, 近似化パターン2に基づき $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ を推定し (図4.1.11) , 描いた分布曲線を図4.1.12 に示す。近似化パターン2による場合は勿論, 近似化パターン1のようなかなり粗い近似を行っても大略, $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ 並びにレベル分布の推定が可能であることが分かる。



第 4.1.14 図 $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ に対する推定値 (信号一周期の観測データに基づく) と実測値との比較

§ 4.1.3 では目的とするレベル分布の推定を行うための入力情報として, 46周期の観測より得た $\mu_n(t)$ を用いたが, 上記考察よりかなり大胆な近似化パターンによっても推定可能であることが分かった。そこで, より入手容易な入力情報から分布推定することを考察する。図4.1.13 は46周期観測した内, 任意に選んだある周期の観測領域内 (図4.1.1参照) での走行車両台数の変動と, これに基づく近似化パターンを示したものである。この近似化パターンに基づき, $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ を推定し (図4.1.14), 分布推定したものが図4.

1.15である。信号一周期の走行車両台数に関する観測情報を用いても、レベル統計量の変動パターン及びレベル分布を推定することが十分可能であることが分かる。



第 4.1.15 図 騒音レベル分布に対する理論（表現法 1）と実験との比較

((●) ; 実測値, 理論的曲線:[——— ; 初項($m=0$), ;
第一項近似曲線($m=2$), ——— ; 第二項近似曲線($m=3$), - · - · -
; 第三項近似曲線($m=4$)])

4.1.5 結言

本節では、第 3 章で考察した信号一周期内での騒音レベル統計量の変動パターンに基づく騒音レベル分布推定法を、騒音発生源である交通流に根ざして考察した。まず、交通流を代表する変数のなかでも、騒音観測点付近での平均走行車両台数の変動パターンを把握することが重要であることを実測データを用いて示した。次いで、平均走行車両台数と騒音の音の強さに関する統計量との回帰モデルを設定し、平均走行車両台数の変動パターン $\mu_N(t)$ から騒音レベル統計量（特に平均，分散）の変動パターン及びレベル分布を推定することを考察した。最後に本考察の正当性を実測データに適用して確認するとともに、 $\mu_N(t)$ の近似化パターンによる分布推定手法に関しても実験的に考察し、その有効性を確認した。

本節では平均走行車両台数 μ_n と騒音の音の強さに関するキュムラント統計量 $K_{n,l}$ を用いているが、この回帰モデルによる交通流とその発生騒音との関係付けの手法は、現実の複雑な騒音の伝搬環境等を回帰係数という形で吸収している。例えば近似化手法に示すように解析的モデルに比較して、大略的傾向を把握すればよいという融通性のある点には留意すべきである。

この節の引用文献

- 1) S.Yamaguchi and Y.Kato; "A Prediction Method of Non-stationary Road Traffic Noise based on Fluctuation Patterns of Average Number of Flowing Vehicles," Applied Acoustics, 27(2), 103-118 (1989).
- 2) S.Yamaguchi and Y.Kato; "A practical method of predicting noise produced by road traffic controlled by traffic signals," The Journal of the Acoustical Society of America, 86(6), 2206-2214 (1989).
- 3) 庄司 光, 山本剛夫, 中村隆一, "街頭騒音とくに交通騒音に関する研究(第1報)," 日本音響学会誌, 19(3), 97-105 (1963).
- 4) K.Takagi, K.Hashimoto, K.Hiramatsu and T.Yamamoto; "Investigation on Road Traffic Noise based on an Exponentially Distributed Vehicles Model- Single Line Flow of Vehicles with Same Acoustic Power," Journal of Sound and Vibration, 36(3), 417-431 (1974).
- 5) 太田光雄, 山口静馬, 広光清次郎; "多車線・多車種・任意長道路の交通騒音予測問題に関する統一的研究(理論とシミュレーション実験)," 日本音響学会誌, 32(7), 403-412 (1976).
- 6) S.Yamaguchi, M.Ohta and K.Nakamura; "A practical probabilistic prediction of road traffic noise from a filtered poisson process model with a simplified elementary time pattern of triangular type," Archives of Acoustics, 10(1), 75-91 (1985).

4. 2 市街地交差点内における騒音レベル 分布予測¹⁾

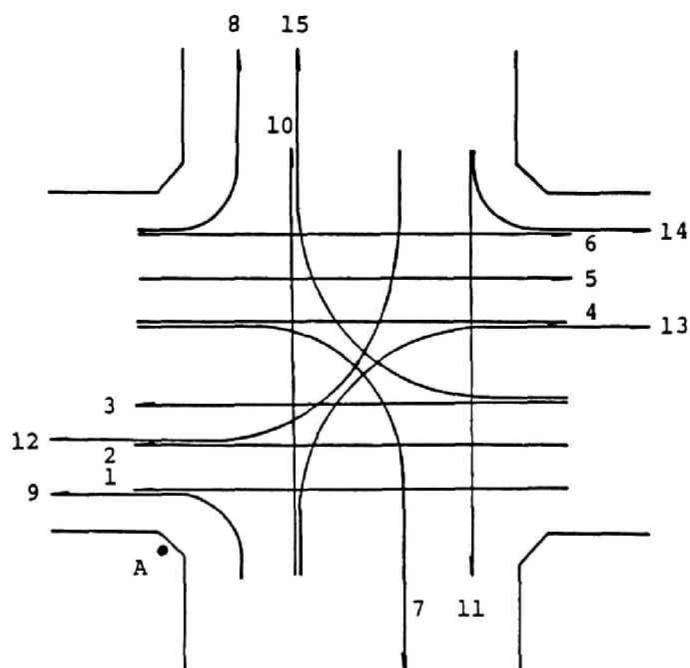
4.2.1 緒言

前節では、信号機の影響を受けた騒音が長時間で示すレベル分布の推定問題を、騒音発生源である交通流に根ざして考察するために、平均走行車両台数と騒音の音の強さに関する統計量との回帰モデルを設立して考察した。本節では、特に § 2.1.2 で実測調査した市街地交差点での騒音レベル分布評価問題を取り上げ、交通流とその発生騒音との関係付けの方法として、4.1節とは異なり、即ち回帰モデルによらず、平均走行車両台数の変動パターンから直接的に計算機シミュレーションによりレベル分布推定することを考察する。

具体的には、観測した交差点内での複雑な交通流状況（車両の軌道、車速度、交通量、車種等）を一旦整理した後、定常走行時でのパワーに関する考察結果²⁾を導入して、計算機シミュレーションによる騒音予測手順を設立する。次いで、この計算機シミュレーションモデル及び整理した交通流情報を用いて騒音の推定を行うために、観測点に支配的に騒音を及ぼす領域（考察対象領域）を推定する。最後に、観測した信号一周内での交通流情報及び、推定した考察対象領域を用いて、計算機シミュレーションによる騒音レベル分布推定を試み本考察の有効性を検討する。

4.2.2 騒音レベルと交通流状態の測定

交通流とその発生騒音を同時観測した道路状況並びに、騒音レベルの変動状況については既に § 2.1.2 で示した。ここでは、58 周期観測した交通流状況を整理する。図4.2.1 は交差点内の交通流を録画したビデオテープを用いて推定した、大略的な車両の軌道（1～15 車線）である。更に、これらの車線に対応して、観測周期 58 周期での車種別（大型・小型）の交通量、及びこれらの平均車速度を整理し表4.2.1 に示す。



第 4.2.1 図 交差点内での車両の軌道

第 4.2.1 表 各車線の交通量及び平均車速度の観測結果（58周期）

車線	大型車[台]	小型車[台]	平均速度[m/s]
1	26	191	8.7
2	110	667	10.2
3	66	459	10.7
4	183	525	11.0
5	76	816	11.6
6	5	154	10.7
7	11	368	6.1
8	6	295	6.5
9	18	338	6.1
10	16	485	7.7
11	10	549	10.0
12	8	360	6.8
13	6	68	4.1
14	5	108	8.3
15	0	69	1.8

4.2.3 観測点に及ぼす支配的道路区間の推定とシミュレーション実験

計算機シミュレーションモデルを設定して、交通流から発生する騒音のレベル分布推定を行うにあたって、騒音観測点付近での伝搬環境を同定しておくことがまず必要である。即ち、市街地交差点内における伝搬環境は直接音のみならず、周囲がビル等の建物で囲まれており反射音の影響も存在すると考えられる^{3), 4), 5)}。更に、直接音に対しても図4.2.

1 に示すごとく、騒音観測点と騒音源である走行車両との軌道が互いに重なり合っているために、車両自体による遮蔽効果も考えられ、定量化することは非常に煩雑である。

そこで本節では、次に示す2つの事柄を設定する。

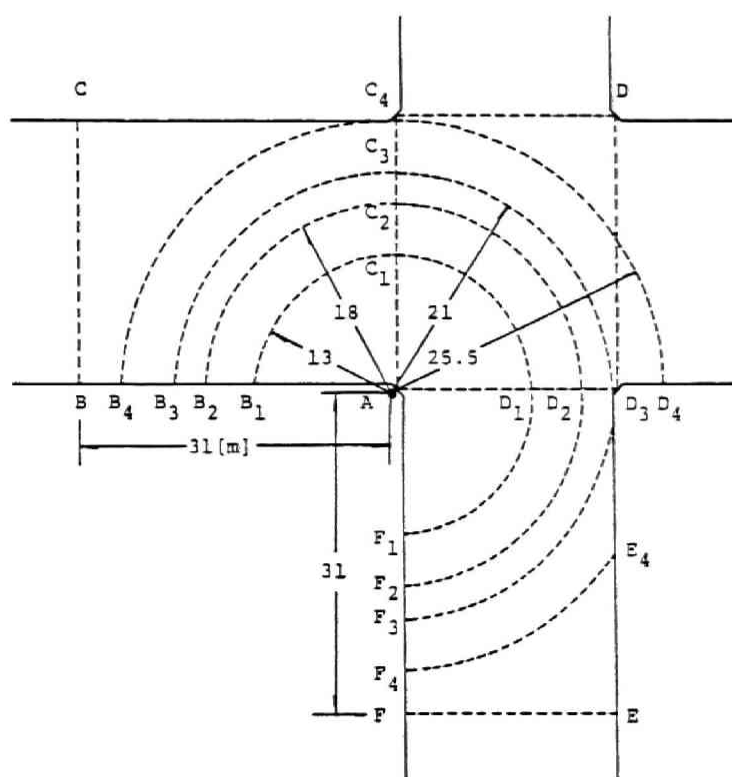
1) 観測点に支配的に騒音を及ぼすと考えられる、いくつかの領域（考察対象領域）を予め設定する（§4.2.3 - 1 考察対象領域の設定）。

2) 定常走行車両のパワーに関する考察結果を導入し、自由音場を仮定したシミュレーションモデルを設定する（§4.2.3 - 2 デジタルシミュレーションモデルの設定）。

この後、実測交通流を用いて、1)で設定した各領域内での車両による発生騒音を、2)でのシミュレーションモデルを用いて推定し、実測値と比較することにより最適な領域を推定する即ち、複雑な伝搬環境を1)と2)を用いて同定する問題をまず考察する（§4.2.3 - 3 考察対象領域の推定）。

4.2.3 - 1 考察対象領域の設定

予め設定した考察対象領域1～5を以下に示す（図4.2.2参照）。



第 4.2.2 図 設定された考察対象領域

領域 1 : A-B₁-C₁-D₁-F₁-A

領域 2 : A-B₂-C₂-D₂-F₂-A

領域 3 : A-B₃-C₃-D₃-F₃-A

領域 4 : A-B₄-C₄-D₄-D₃-E₄-F₄-A

領域 5 : A-B-C-C₄-D-D₃-E-F-A

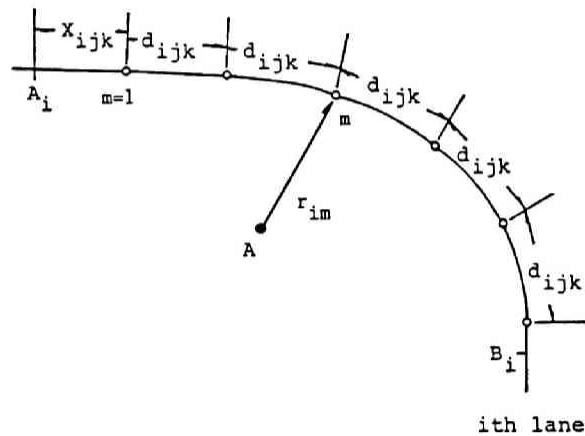
4.2.3 - 2 デジタルシミュレーションモデルの設定

騒音観測点へ支配的に騒音を及ぼす領域を同定するために、以下に示すデジタルシミュレーションモデルを設定する。

いま、 $n(i, j, k)$ を第 i 車線 ($i=1, 2, \dots, 15$), 第 j 時刻 ($j=1, 2, \dots, 140$), 第 k 周期 ($k=1, 2, \dots, 58$) における考察対象領域内での走行車両台数とする。これらの車両は考察対象領域 $[A_i, B_i]$ 内で車頭間隔 d_{ijk}

$$d_{ijk} = (A_i - B_i - X_{ijk}) / n(i, j, k) \quad (4.2.1)$$

で走行しているとする（等間隔モデル）。ここに X_{ijk} は初期位相であり、区間 $[0, X_{ijk0}]$ ($X_{ijk0} = (A_i - B_i) / (n(i, j, k) + 1)$) で一様分布に従うとする（図4.2.3 参照）。



第 4.2.3 図 シミュレーションのための車両配置モデル

次に各車両の発生パワーレベルに関して考察する。各車両は信号機に制御され、信号一周期内で加速、定常走行、減速、停止といった状態が生ずる。これまでに定常走行状態で

の発生パワーレベルの速度依存性のみならず、加速や減速状態及び停車状態でのパワーレベルの実測調査が行われ報告されている^{6)・7)}。基本的には、これらの報告に基づき各走行状態を推定し、車両速度や加速度を定量化した上で本シミュレーションモデルに組み入れるべきであるが、非常に煩雑となる。そこで、本考察では考察対象区間に存在する車両のパワーレベルは、以下のモデルに示すように、走行速度のみに依存し、この速度として平均走行速度を用いることとする²⁾。この近似化によって生じるシミュレーション結果に対する考察は § 4.2.3-3 で行う：

A - 速度 V [km/h] で走行する大型車 ($N=1$) のパワーレベルは

$$\begin{aligned} \text{平均：} \quad \mu(1) &= 97 + 0.2 V \quad [\text{dB(A)}] \\ & \hspace{15em} (4.2.2) \end{aligned}$$

$$\text{標準偏差：} \sigma(1) = 3.3 \quad [\text{dB(A)}]$$

のガウス分布に従う

B - 速度 V [km/h] で走行する小型車 ($N=2$) のパワーレベルは

$$\begin{aligned} \text{平均：} \quad \mu(2) &= 87 + 0.2 V \quad [\text{dB(A)}] \\ & \hspace{15em} (4.2.3) \end{aligned}$$

$$\text{標準偏差：} \sigma(2) = 3.6 \quad [\text{dB(A)}]$$

のガウス分布に従う

上記車両配置モデル及びパワーレベルに関するモデルを用いるシミュレーションの手順を以下に示す。

手順1：第 k 周期，第 j 時刻，第 i 車線 において第 l 番目の車両に着目する（図4.2.3 参照）

手順2：一様分布（変域 $[0, 1]$ ）に従う一様乱数 R_1 を発生させ，次のように第 l 車両の車種を決定する。

$$\text{if } 0 \leq R_1 \leq \theta(i) \quad \text{ならば} \quad N=1$$

if $\theta(i) < R_1 \leq 1$ ならば $N=2$

ただし、 $\theta(i)$ は第 i 車線の大型車混入率である。

手順3：正規分布（平均 0，標準偏差 1）に従う乱数 R_2 を発生させる。平均車両走行速度 $V(i)$ 及びパワーモデル A, B（(4.2.2)式，(4.2.3)式参照）を用いて次式に従い第 m 車両のパワーレベル L_{im} を決定する。

$$L_{im} = \mu(N) + R_2 \cdot \sigma(N) \quad (N=1 \text{ or } 2) \quad (4.2.4)$$

手順4：考察対象区間内の全ての車両について観測点での音の強さ I_{im} ($\triangleq 10^{L_{im}/10}$) の和を取る。

$$I(j, k) = \sum_{i=1}^{15} \sum_{m=1}^{n(i, j, k)} I_{im} / (4\pi r_{im}^2) \quad (4.2.5)$$

手順5：暗騒音の音の強さ I_B を考慮し、観測点での騒音レベル $L(i, j)$ を次式により決定する。

$$L(i, j) = 10 \cdot \log[I(i, j) + I_B] \quad (4.2.6)$$

4.2.3 - 3 考察対象領域の推定

交通流を58周期観測して得られた実測データ $n(i, j, k)$, $\theta(i)$, $V(i)$ を用いて §4.2.3-1 で示した各領域（領域 1～5）について §4.2.3-2 に示した手順に従いシミュレーション実験を行った。図4.2.4 (1)～(5) は各領域に対してシミュレーションを行い、一旦発生した58 周期分のレベルデータを用いて算定した平均レベルの変動パターン $\mu_L(t)$ 及び標準偏差の変動パターン $\sigma_L(t)$ を実測値と併せ示したものである。これらのシミュレーション結果より次のことが分かる。

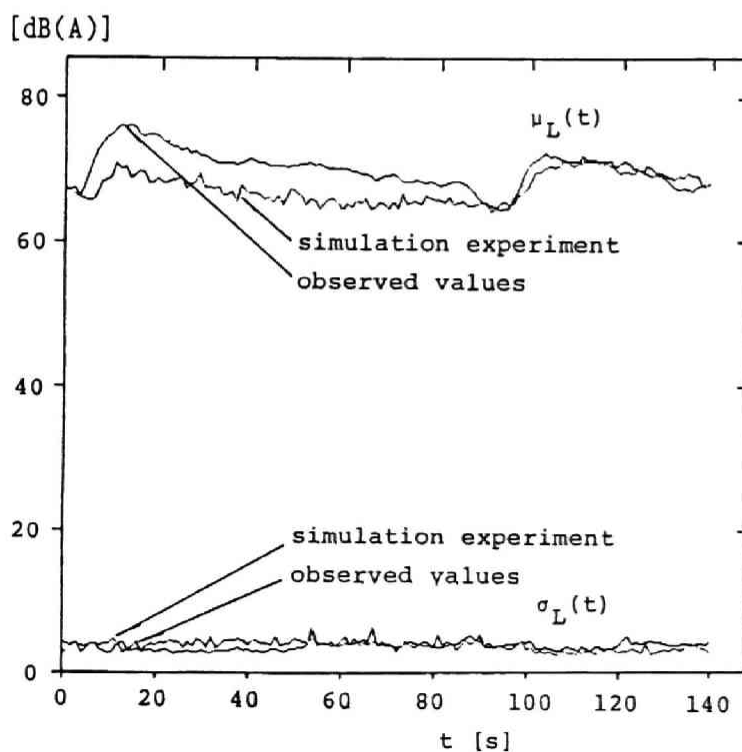
1) 考察対象領域を広げていけば、特にシミュレーションによる $\mu_L(t)$ は実測値に近づいていく（領域 1～4）。

2) 領域を更に広げても（領域5）， $\mu_L(t)$ の大きさは、ほとんど変化しなくなる。従っ

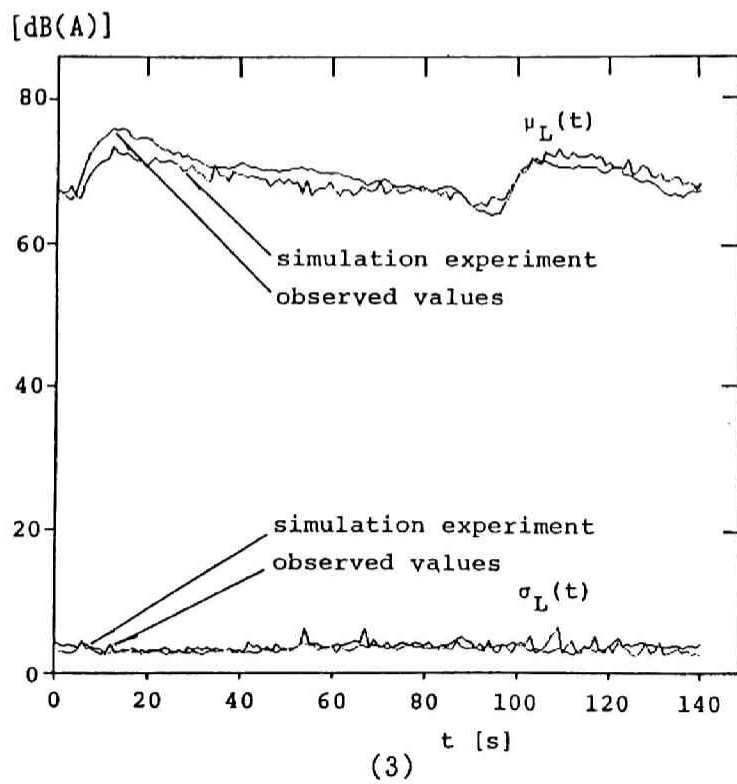
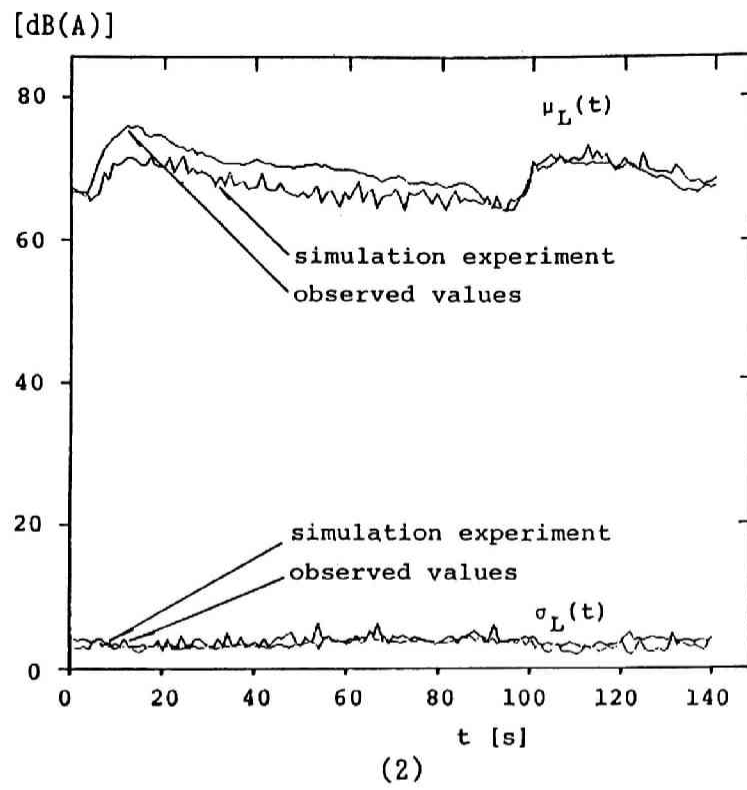
て、1) と考え併せ考慮すべき対象領域は領域4程度と推定される。

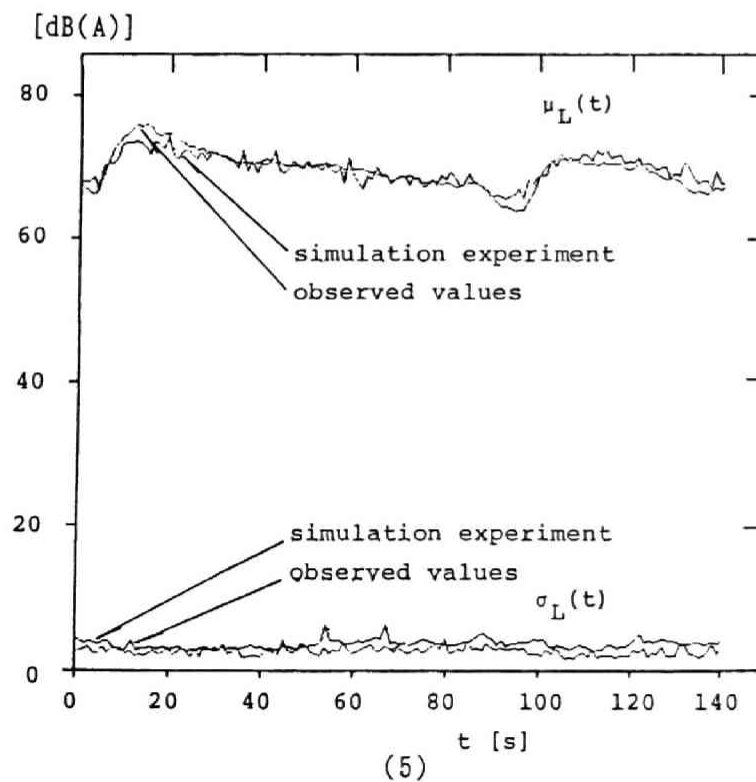
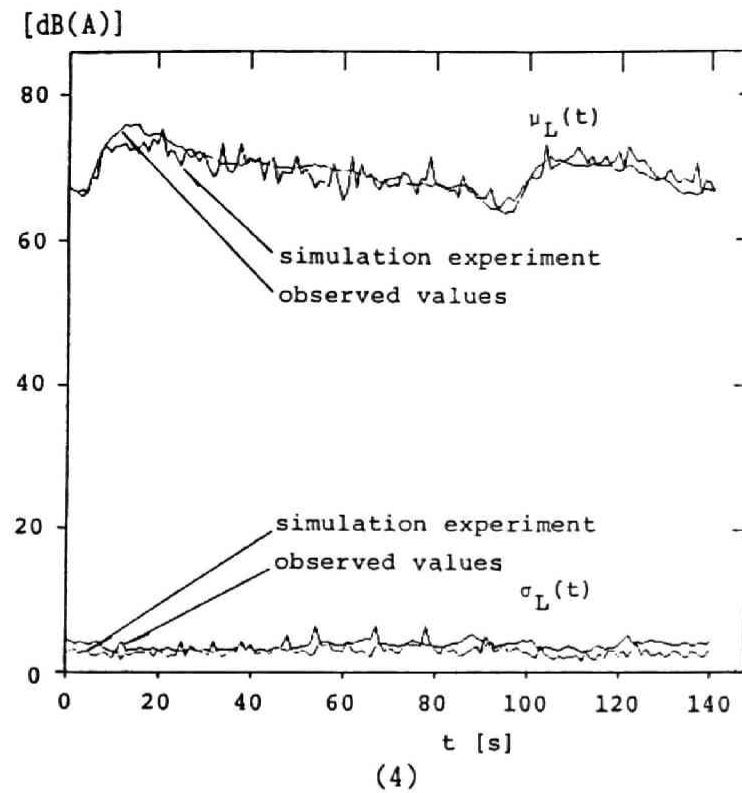
3) 図4.2.4 (4), (5) (領域4, 領域5) の場合, $\mu_L(t)$ の初めのピーク値 (14[秒]) 付近でシミュレーション値は幾分実測値より低く算定される。これは、第1車線から第6車線方向の交通流は停止状態から発進・加速度状態に移している、特に 2, 4 車線での交通量が多く、大型車両の比率が高い (表 4.2.1 参照) にもかかわらず、§4.2.3-2 で設立したシミュレーションモデルは加速時でのパワーレベルを考慮せず、平均走行速度による定常走行パワーモデルで代表した影響と考えられる。

しかしながら、§4.2.3-2 で設定した単純なシミュレーションモデルを用いても図4.2.3 (4) に示す程度の推定は可能であることが分かる。この一つの理由は、本シミュレーションモデルは騒音源である観測点付近での走行車両台数の変動を $n(i, j, k)$ として基本的に抑えている点にあると考えられる。ちなみに、このときのシミュレーションによる騒音レベル分布と実測値とを図4.2.5 に比較して示す。分布の端で少し誤差があるが、かなりよく推定していることが分かる。

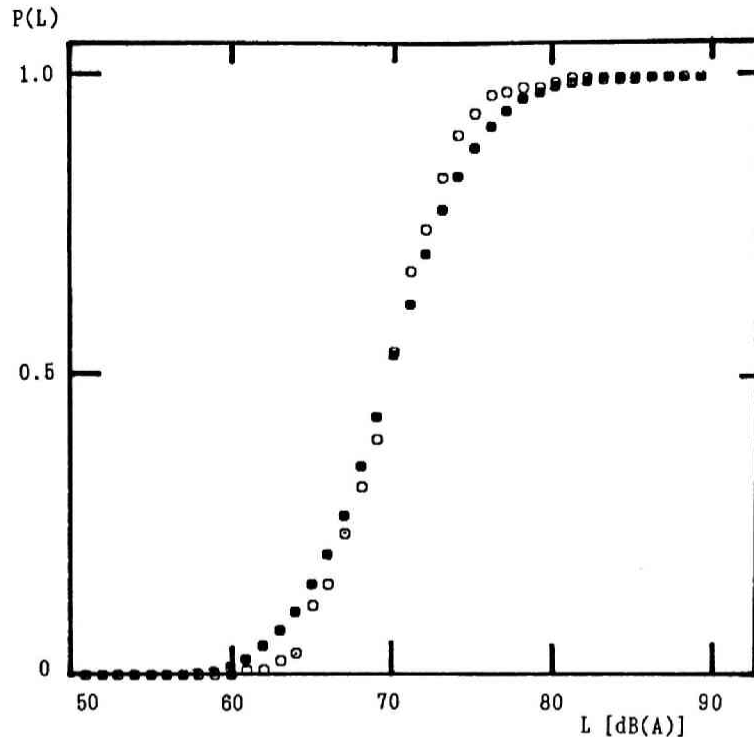


(1)





第 4.2.4 図 $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ に対するシミュレーション値と実測値との比較
 (1); 領域 1 の場合, (2); 領域 2 の場合, (3); 領域 3 の場合,
 (4); 領域 4 の場合, (5); 領域 5 の場合)

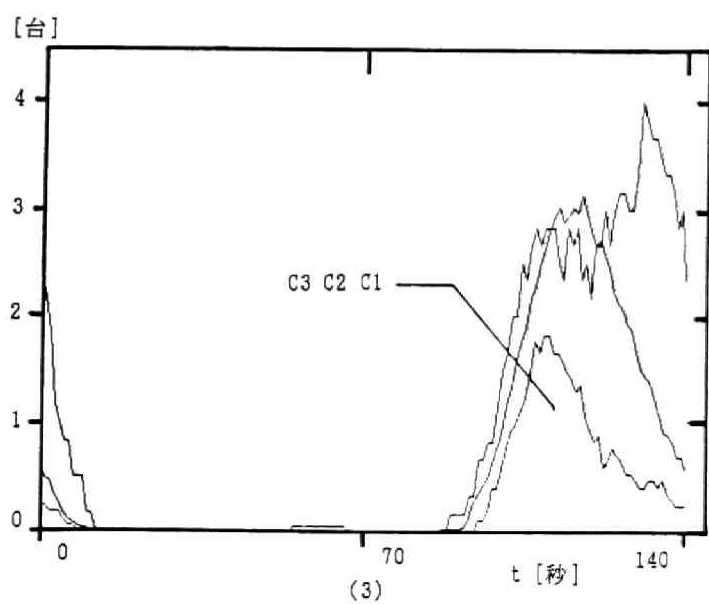
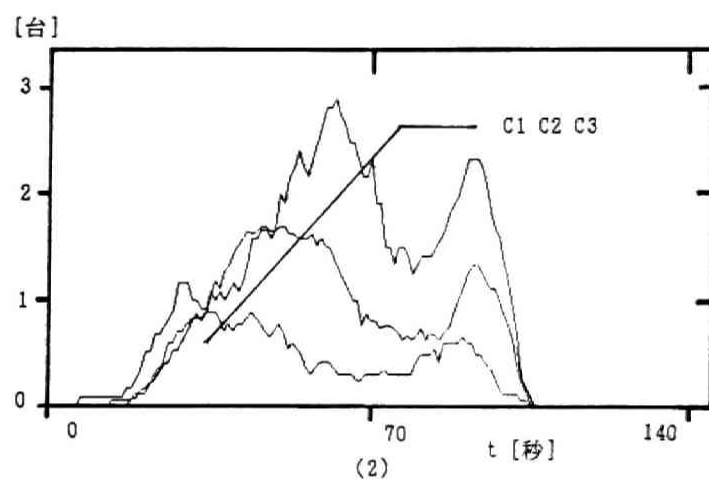
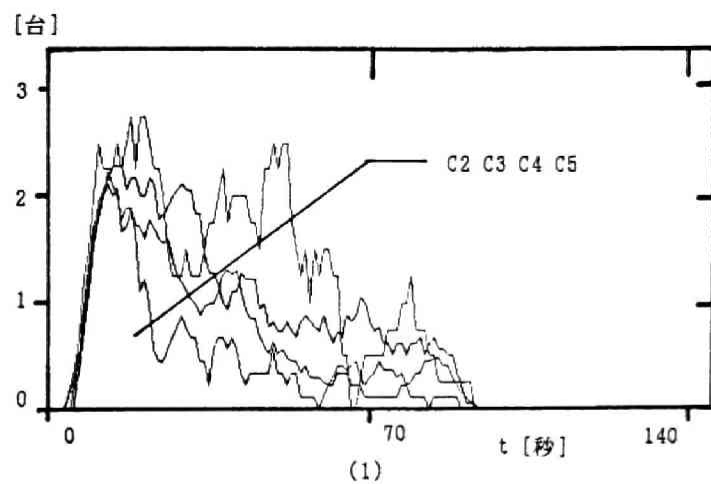


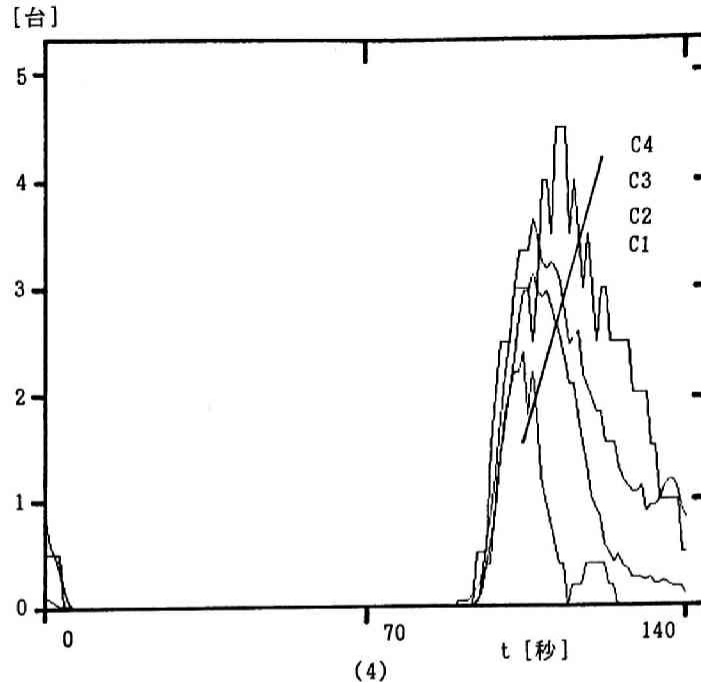
第 4.2.5 図 騒音レベル分布に対するシミュレーションと実験との比較
((●);実測値, (○);シミュレーション値)

4.2.4 騒音レベル分布の数値的評価結果

§ 4.2.3 ではシミュレーションモデルを用いて、考察対象領域を推定するために実測データとして、 $n(i, j, k)$, $\theta(i)$ 及び $V(i)$ (暗騒音の強さ I_0 は大略的でよい) を必要とした。特に考察対象領域内での走行車両台数 $n(i, j, k)$ を得るには多くの時間と労力を要する。そこで、 $n(i, j, k)$ に対して以下に示す単純な実験的考察を行い騒音レベル分布推定に役立てる。

図 4.2.6 (1)～(4)は、それぞれ第 2, 7, 9, 10 車線 (図 4.2.1 参照) の考察対象区間内の走行車両に対して、信号一周期の流量が C1:0～5[台]未満, C2:5～10[台]未満, C3:10～15[台]未満 C4:15～20[台]未満及び C5:20[台]以上、である 5 つの階級を予め設定し、58 周期のデータを用いて各階級での平均的 $n(i, j, k)$ の変動パターンを示したものである。図 4.2.6 から信号機の点滅の影響が明確に分かるのみならず、流量による $n(i, j, k)$ の変動パターンの違いも顕著に現れていることが分かる。残りの車線についても同様のことが成立する。従って、一旦考察地点に固有なこのような変動パターンを調べておけば、信号一周期あるいは単位時間での流量を与えて、シミュレーションにより騒音レベル分布の予測に役立てることが出来る。





第 4.2.6 図 観測された平均走行車両台数の変動パターン

((1);第2車線,(2);第7車線,(3);第9車線,(4);第10車線)

ここでは、図4.2.6に示す信号一周期の流量で階級化された $n(i, j, k)$ を用いてシミュレーション実験を行い、本手法の有効性を検討する。表4.2.2 は58周期観測した交通流がどの階級に属していたかを示したものである。但し、 C_i を単に i ($i=1, \dots, 5$)と示している。この表から

場合 (a):流量が比較的多かった周期 (第 8, 14, 37, 42 周期)

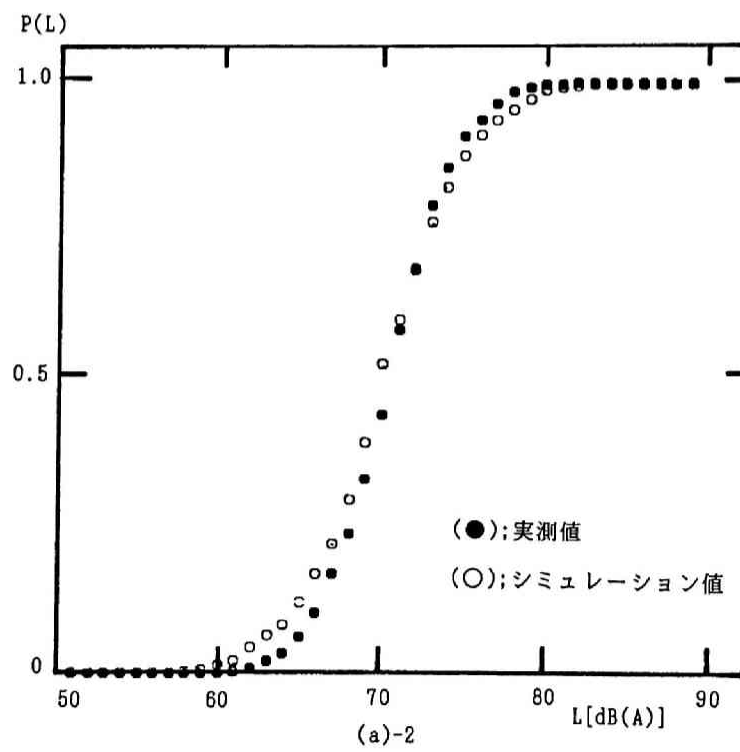
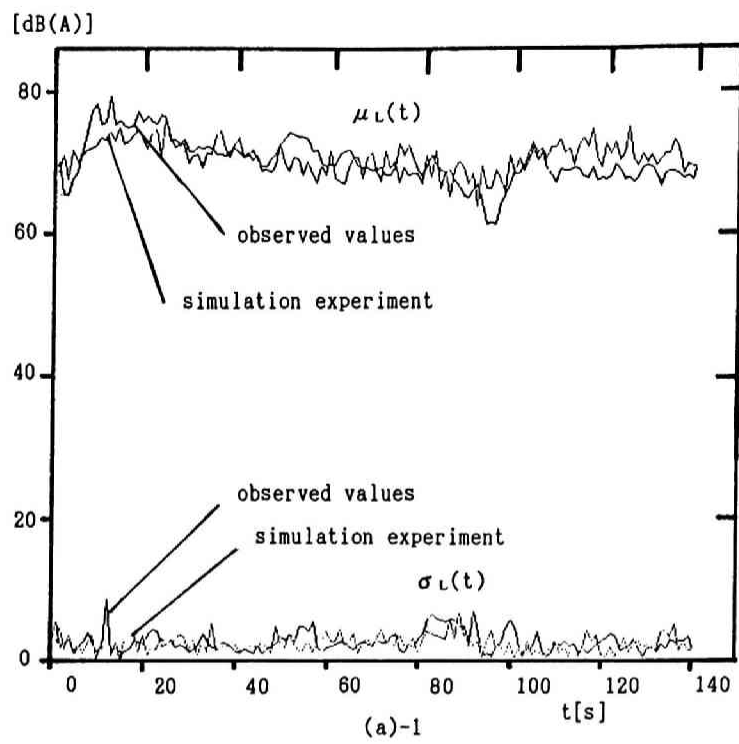
場合 (b):流量が比較的少なかった周期 (第 1, 3, 10, 20, 26, 30, 32, 53, 55, 57, 58 周期)

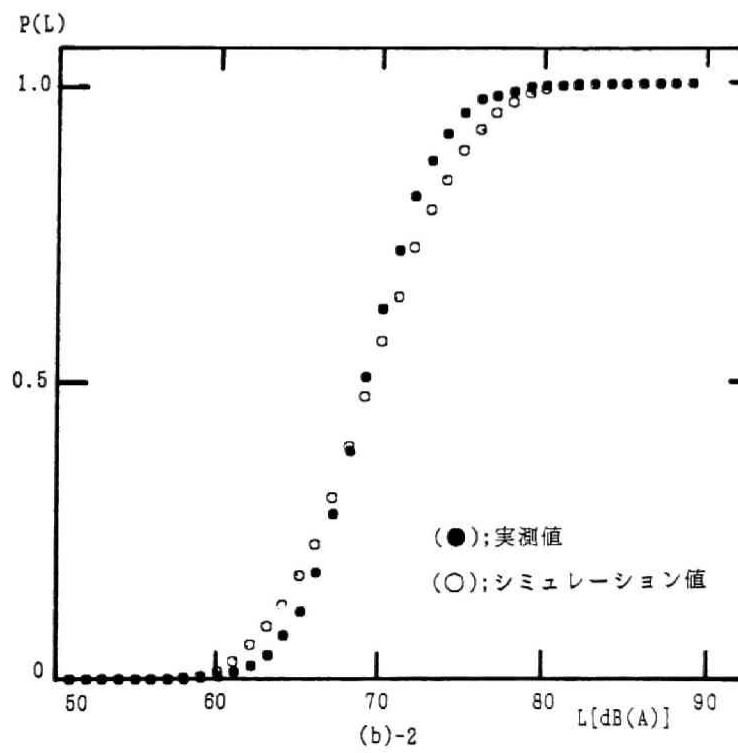
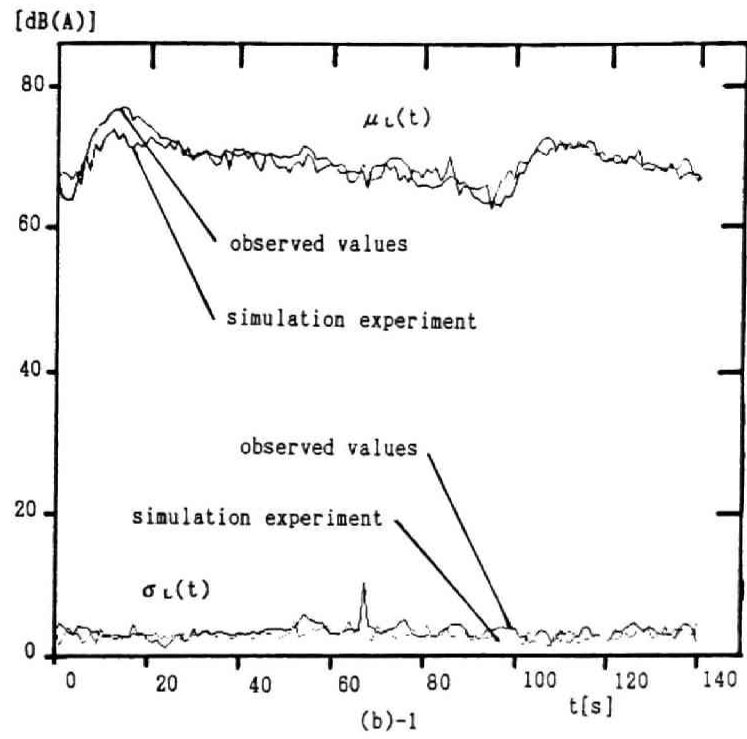
場合 (c):単に第1周期から第10周期

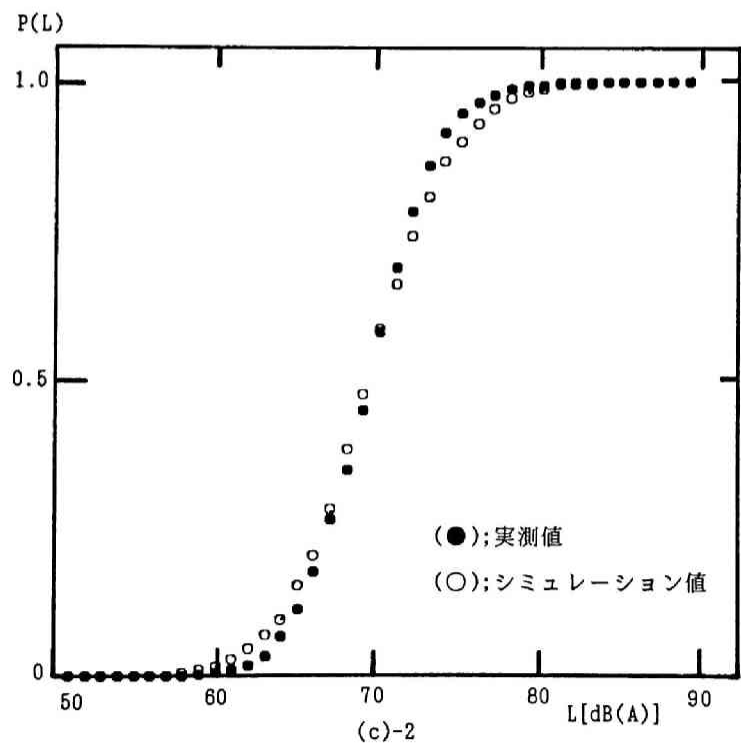
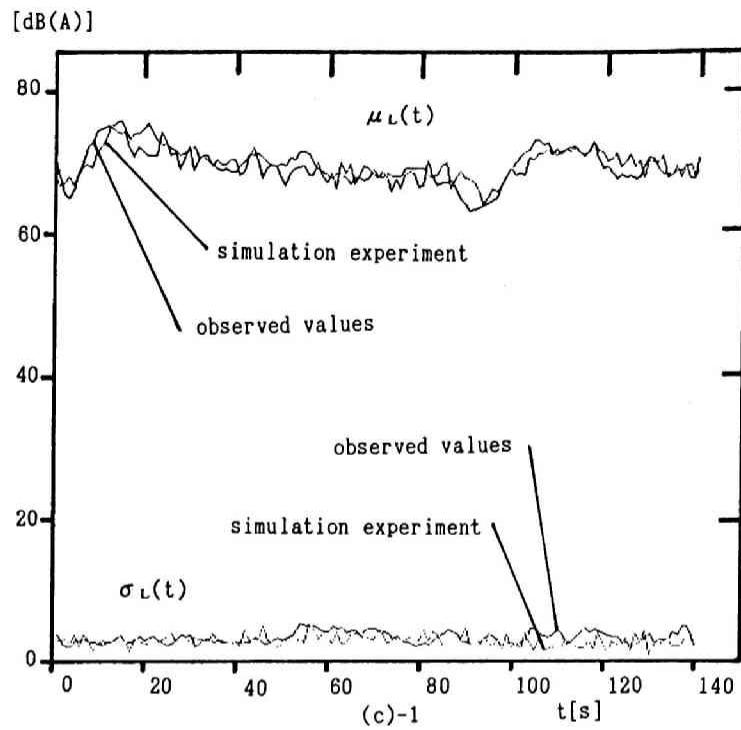
に対して、階級値及び表4.2.1 から得られる $\theta(i)$, $V(i)$ を入力情報としてシミュレーション実験を行い、対応する実測値と $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ 及びレベル分布で比較したものが図4.2.7 (a)-1, (a)-2, ..., (c)-2である。何れの実験結果においても、シミュレーションによる $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ 及びレベル分布は実測値の大略を捉えていることが分かる。従って、本シミュレーション手法及び代表的な変動パターンを用いることの有効性が窺われる。

第 4.2.2 表 58周期観測した各車線での流量の階級値 (1:[0,5)[台],
2:[5,10)[台],3:[10,15)[台],4:[15,20)[台],5:20以上[台])

車線	周期														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	3	3	3	4	1	2	2	2	1	3	1	1	1	1
2	1	3	2	2	3	1	2	2	3	2	3	1	1	1	1
3	1	3	1	2	4	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1
4	1	2	4	3	3	2	2	1	2	4	3	1	1	1	1
5	2	4	2	3	4	1	1	1	2	2	4	2	1	1	1
6	1	3	2	4	5	1	3	1	2	2	3	3	1	1	1
7	1	4	3	4	3	2	2	1	3	2	1	1	1	1	1
8	2	3	3	3	4	1	1	3	3	3	2	1	1	1	1
9	1	3	1	2	3	1	1	2	2	3	3	2	1	1	1
10	1	3	3	3	5	1	2	2	1	2	2	3	1	1	1
11	1	2	2	4	3	1	1	2	1	2	3	3	1	1	1
12	1	4	2	4	3	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1
13	2	2	2	3	3	1	3	2	1	3	3	1	1	1	1
14	2	4	3	4	5	1	2	1	2	2	3	2	1	1	1
15	1	4	2	2	5	1	3	1	2	2	2	2	1	1	1
16	1	4	2	5	4	1	1	2	1	2	3	2	1	1	1
17	1	3	4	3	4	1	1	1	1	2	3	2	1	1	1
18	1	2	2	4	3	1	1	2	2	1	3	2	1	1	1
19	1	4	2	3	3	1	1	2	1	2	3	2	1	1	1
20	1	3	2	3	3	1	3	1	1	2	4	2	1	1	1
21	2	3	2	2	4	2	1	1	1	2	2	3	1	1	1
22	2	3	3	2	3	1	3	1	2	2	2	2	1	1	1
23	2	4	2	3	3	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1
24	2	2	2	3	4	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1
25	1	3	2	5	4	2	2	1	2	3	3	1	1	1	1
26	1	2	2	3	4	1	3	2	2	2	3	2	1	1	1
27	2	3	2	3	3	1	3	1	2	4	1	1	1	1	1
28	2	4	4	3	4	1	1	1	2	1	3	2	1	1	1
29	1	2	3	2	4	2	2	2	2	3	3	1	1	1	1
30	1	3	3	3	4	1	2	1	1	2	2	2	1	1	1
31	2	3	2	4	3	1	3	2	1	2	2	1	1	1	1
32	1	2	2	3	3	1	3	1	2	2	3	1	1	1	1
33	2	4	3	4	4	1	2	1	1	2	2	3	1	1	1
34	1	3	3	4	5	1	2	1	2	3	2	2	1	1	1
35	1	5	2	4	4	1	2	2	1	3	3	2	1	1	1
36	2	3	2	2	4	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1
37	1	4	5	3	4	1	2	2	3	3	2	1	1	1	1
38	1	2	2	3	3	1	1	2	2	3	3	3	1	1	1
39	3	5	3	3	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1
40	1	3	2	3	4	1	2	2	2	2	3	3	1	1	1
41	1	4	3	3	4	1	2	1	2	2	3	2	1	1	1
42	2	5	3	3	4	1	2	1	3	3	3	2	1	1	1
43	2	3	2	3	3	1	3	1	3	2	3	1	2	1	1
44	2	4	3	2	4	1	2	2	2	3	2	3	1	1	1
45	1	4	2	2	3	1	2	1	2	3	3	1	1	1	1
46	1	3	2	3	5	1	2	2	3	2	2	3	1	2	1
47	1	4	1	2	4	1	2	1	2	3	3	2	1	1	1
48	2	4	2	3	3	1	2	2	2	3	1	1	1	1	1
49	1	4	3	4	4	1	2	1	2	3	3	1	1	1	1
50	1	3	2	3	5	1	3	3	2	3	3	1	1	1	1
51	2	5	2	2	4	1	2	2	2	2	3	2	1	1	1
52	2	3	3	3	4	2	3	2	1	1	2	3	1	1	1
53	1	3	2	3	3	1	1	2	1	1	3	2	1	1	1
54	1	4	2	3	4	1	1	2	1	2	3	2	1	1	1
55	1	3	3	3	3	1	2	2	2	2	3	2	1	1	1
56	1	3	2	3	3	1	1	1	2	2	3	2	1	1	1
57	1	3	3	3	2	1	2	2	2	2	3	2	1	1	1
58	1	3	2	3	4	1	2	2	2	2	3	2	1	1	1







第 4.2.7 図 $\mu_L(t)$, $\sigma_L(t)$ 及び騒音レベル分布に対するシミュレーションと実験との比較 ((a); 流量が比較的多かった周期, (b); 流量が比較的少なかった周期, (c); 第 1 周期から第 10 周期)

4.2.5 結言

本節では、特に § 2.1.2 で観測された市街地交差点内での騒音レベル分布推定問題に焦点を当てて、シミュレーション実験を中心に次に記す考察を行った。

1) 交差点内での複雑な交通流や音場環境を整理し、簡易なシミュレーションモデルに基づき音場を同定することを試みた。

2) 信号一周期での流量が与えられるなら、これに対応する平均的走行車両台数の変動パターンがほぼ決まり、この変動パターンを入力情報（他に平均車速度、車種混入率が必要）として 1) で設定したシミュレーションモデルにより騒音レベル分布の推定可能なことを実験的に示した。

交通流に根ざして、計算機シミュレーションモデルにより騒音レベル分布推定を行う本節の考察を通じて、次の2点には留意すべきである。

1) 前節と同様に、平均走行車両台数の変動パターンがその中心的役割を果たしていること。

2) 前節で考察した回帰モデルでは平均走行車両台数のみに着目し、この要因以外はすべて回帰係数の中に吸収させていた。本節の考察から、この回帰係数を推定するためには、交通流情報として、他に平均速度、車種混入率が必要となろうこと（この問題については、第5章以降で詳細に検討する）。

この節の引用文献

- 1) Y.Kato and S.Yamaguchi; "A Prediction Method for Probability Distribution of Road Traffic Noise at an Intersection," *Acoustics Australia*, 18(2), 45-50 (1990).
- 2) 佐々木 實, 山下充康; "道路特殊箇所の騒音の予測に関する検討 - インターチェンジ部周辺 -," *日本音響学会誌*, 40(9), 638-643 (1984).
- 3) F.M.Wiener, C.I.Malme and C.M.Gogos; "Sound propagation in Urban Areas," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37(4), 738-747 (1965)
- 4) H.G.Davies; "Noise propagation in corridors," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 53(5), 1253-1262 (1973).
- 5) H.G.Davies; "Multiple-reflection diffuse-scattering model for noise propagation in streets," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 64(2), 517

-521 (1978).

- 6) N. Olson; "Survey of motor vehicles noise," The Journal of the Acoustical Society of America, 52(5), 1291-1306 (1972).
- 7) R. K. Hillquist and W. N. Scott; "Motor vehicle noise spectra: their characteristics upon operating parameters," The Journal of the Acoustical Society of America, 53(1), 2-10 (1975).

第5章 交通流情報に基づく周期的 非定常道路騒音の予測

第2章から考察対象である信号機周辺での交通流現象とその発生騒音を同時観測し、得られた知見及び実測データに基づき、目的とする長時間スケールでの騒音レベル分布を表現する方法論を発展させてきた。特に、第4章では騒音発生源である交通流より騒音レベル分布を推定（あるいは予測）するためには、1)平均走行車両台数の変動パターン、2)平均走行速度、3)車種混入率の情報が重要となることを実測データを用いて検証し、着目すべき変量を明かにした。

しかしながら、これらの情報のうち、1)及び2)に関しては、道路状況を一旦設定するなば、交通流そのものに内在する動的メカニズムによってそれらの大略が定まる変量であり、例えば、新設道路での騒音評価問題に対し、それらを全く任意に、そして全く独立に設定して発生騒音の可能性を検討するといったことが可能な変量ではない。即ち、騒音発生源である交通流に立脚して、目的とする騒音レベル分布を予測するためには、信号機の点滅によってどのような交通流状態が生ずるのかを予め考察しておく必要がある。

そこで本章では、交通流に内在する動的メカニズムを足場として目的の騒音レベル分布を推定あるいは予測することをめざして、§2.1.3で実測調査を行った数多くの信号機が連なった幹線道路状況を採用し、交通工学分野でよく知られている流体力学的交通流理論を援用して交通流の状態推定問題を理論的並びに実験的に考察する。次いで、第4章での考察に帰着させ、推定された交通流の状態変数を用いて目的とするレベル分布の推定を試みる。

具体的には、5.1節ではまず実道路状況へ流体力学的交通流理論を適用し具体化するための簡易な解析手順を新たに設立する。この解析手順を§2.1.3で実測調査した交通流データに適用して交通流状態が推定可能であることを示す。更に4.1節でレベル分布推定を行うために、中心的役割を果たし、実測値より算定した平均走行車両台数の変動パターンに代わり、理論的考察に基づき推定された平均流量変動パターンを用いて分布推定が行えることを示す。

5.2節では、5.1節で推定された交通流の状態変数を用いて、これまで問題点として残されていた次の2点即ち：

1) 5.1 節では、平均流量の変動パターンと騒音の音の強さに関する統計量との回帰的關係を具体的に定めるにあたり実測騒音データを用いていたこと、

2) 第3章で考察した分布表現が無限級数展開表現となっていたこと、
の改善を行い、純予測の立場から騒音レベル分布を求めることを試みる。

尚、本章の考察結果を基盤として、より実用的で簡易な騒音レベル分布予測方式に関する考察は第6章で詳論する。

5. 1 流体力学的交通流理論に基づく騒音¹⁾ レベル分布の予測

5.1.1 緒言

一般に交通流は、その交通量がそれ程多くない状況では、ドライバーの個性的あるは恣意的な運転操作等により、個々の車両ごとに不規則な走行状況が生じるが、交通量が多くなるにつれ車両が集団として走行する状況になり、各ドライバーの個性等は次第に集団の中に吸収されて、集団としての性質を示すようになる。このような交通流状況での交通流の動的メカニズムを記述する一手法として、流体力学的交通流理論²⁾がよく知られている。この交通流理論は、交通流状態を3つの平均的変量（交通状態変数）即ち、平均車両密度、平均車両速度、平均交通量によって代表し、これらの変量を用いて交通流の動的メカニズムを記述するものである。

一方、第4章までの考察において、例えば平均的走行車両台数の変動パターン、平均走行速度等の交通流に関する平均的変量を捉えることが、目的とする騒音レベル分布を推定あるいは予測するために重要であることを既に明らかにしている。従って、上記流体力学的交通流理論を援用し、信号機の周期的点滅により生じる平均的交通流状態を解析できれば、この交通流から発生する騒音を予測する問題（第4章までの考察における課題）が解決されよう。

本節では、このような観点から § 2.1.3 で実測調査を行った数多くの信号機が連なった幹線道路状況を探り上げ、流体力学的交通流理論を具体的に適用して信号一周期内の交通流状態変数を推定することに第一の主眼を置く。具体的には、この交通流モデルから発生する数多くの衝撃波（その時間的な動的挙動は微分方程式によって支配される）の軌跡を求める簡便な解析手順（アルゴリズム）をまず新たに設立し、これを実道路へ適用することによって信号一周期にわたる交通状態変数の時間的変動パターンを推定することを提案する。次いで、理論的解析手法の正当性をまず確認するため、平均車両台数の変動パターンに関する実測データに適用して実験的検証を行う。

最後に、推定された状態変数の時間的変動パターンのうち、次の2つの変動パターンを用いた場合：

- 1) 道路の考察対象区間内に存在する車両の単なる平均台数の変動パターンを用いた場合

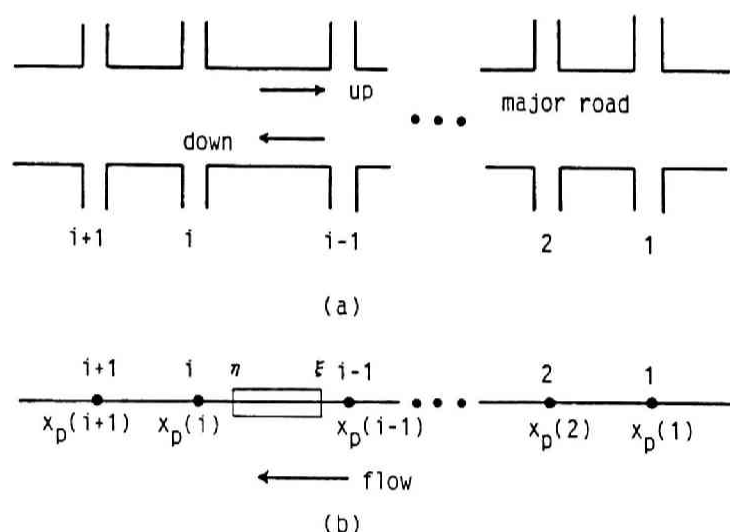
2) 平均台数と平均速度の積で与えられる平均流量の変動パターンを用いた場合について、4.1 節での考察に帰着させて長時間スケールでの騒音レベル分布を推定し、実測騒音データとの比較検討を行う。

5.1.2 道路状況と交通流に対するモデルの設定

図5.1.1(a)に示すような数多くの交差点（各交差点には信号機が設置されていると仮定する）を持つ現実的な道路状況に着目し、主道路は片側各1車線を有するものとする。各車線に対して次のような仮定を導入する（図5.1.1(b)参照）。

A. 全ての交差点の大きさは交差点間の距離に比して十分小であるとし、第 i 番目 ($i=1, 2, \dots$) の交差点の位置を $x_p(i)$ とする。またこの点は副道路による流入・流出を示す車両の発生・消滅点でもある。

B. 第 i 番目の信号機において、主道路（副道路）側から見て信号が赤または青となる時刻をそれぞれ $t_R(i), t_B(i)$ ($t_r(i), t_b(i)$) とする。通常なされるように時間長の短い黄信号は無視する。



第 5.1.1 図 信号機の連なる考察道路状況とそのモデル

以上の道路状況の下に交通流モデルを次のように設定する²⁾。

(1) $x_p(i-1)$ と $x_p(i)$ の間の道路区間に着目する。任意の位置 x , 時刻 t における車両の平均速度, 平均車両密度および平均流量をそれぞれ $u(x, t)$, $\rho(x, t)$, $q(x, t)$ ($= u(x, t) \cdot \rho(x, t)$) とする。このとき, $x_p(i-1)$ と $x_p(i)$ を含まぬ領域で次の積分保存則が成

立する。

$$d/dt \cdot \int_{\xi}^{\eta} \rho(x, t) dx = q(\xi, t) - q(\eta, t) \quad (5.1.1)$$

(2) u は ρ のみの関数であるとし ($u(\rho)$)，更に解析の複雑化を避けるため，次のグリーンシールズモデル³⁾：

$$u(\rho) = u_m (1 - \rho / \rho_m) \quad (5.1.2)$$

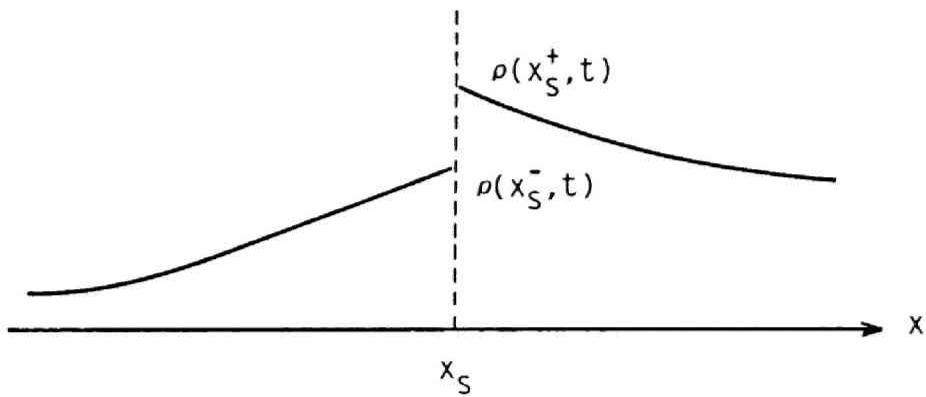
ρ_m ：最大密度， u_m ：最大走行速度

を採用する。このとき流量は直ちに次式となる。

$$q(\rho) = \rho \cdot u = \rho \cdot u_m (1 - \rho / \rho_m) \quad (5.1.3)$$

(3) ρ と q が連続であれば，(5.1.1) 式は次の微分保存則となる。

$$\partial \rho / \partial t + dq/d\rho \cdot \partial \rho / \partial x = 0 \quad (5.1.4)$$



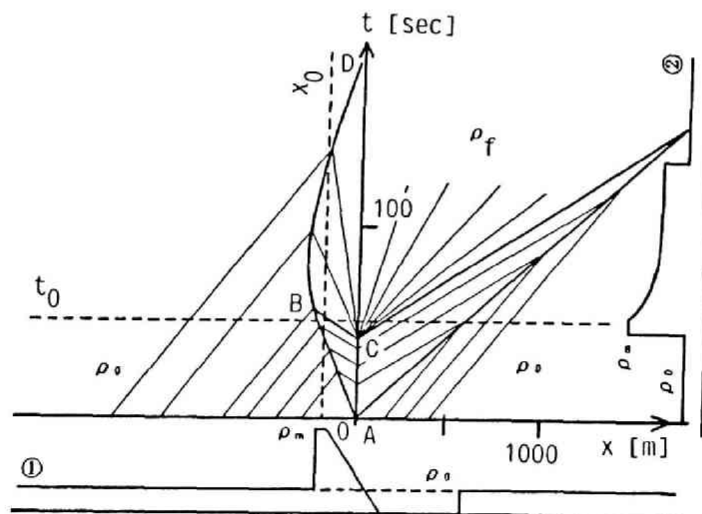
第 5.1.2 図 衝撃波のモデル

(4) ρ が $x=x_S$ で不連続 (図5.1.2 参照) であれば

$$dx_s/dt = (q(x_s, t) - q(x_s^+, t)) / (\rho(x_s, t) - \rho(x_s^+, t)) \quad (5.1.5)$$

の速度で伝播する衝撃波が生ずる。

さて、図5.1.1の複雑な道路状況に対する具体的解析を行う前に、基礎となる次の単純化された道路状況についてまず考察しておこう。この単純化モデルに対する解析内容に限っては文献2) 27章とほとんど同じであるが、§5.1.3以降の説明の便宜性と解析アルゴリズム設立の必要性を明かにするため、敢えてここに再掲する。即ち、信号機1のみが存在し、 $x_0(1)$ を座標軸の原点にとり $x_0(1)=0$ とする道路で、副道路による車両の発生・消滅はないものとする。また、交通流は一定の平均車両密度 $\rho - \rho_0$ で流れており ($t < 0$)、信号機が $t=0$ で赤 ($t_R(1)=0$)、 $t=\tau$ ($=40$)で青 ($t_B(1)=40$)となる場合を考える。図5.1.3は(5.1.5)式を解いて得られる衝撃波の軌跡(図中の太線：これによって密度領域が区分される)や各領域における密度波の軌跡(図中の細線)を($x-t$)平面上に描いたものである。解析手順の概要を付録に示す(詳細は文献2) 27章参照)。この $x-t$ 特性曲線を一旦求めれば、任意の (x, t)における密度を得ることができる。一例として、 $t=t_0$ における密度の空間的分布 $\rho(x, t_0)$ と $x=x_0$ における密度の時間的变化 $\rho(x_0, t)$ をそれぞれ①、②として図5.1.3の中に併せ示している。

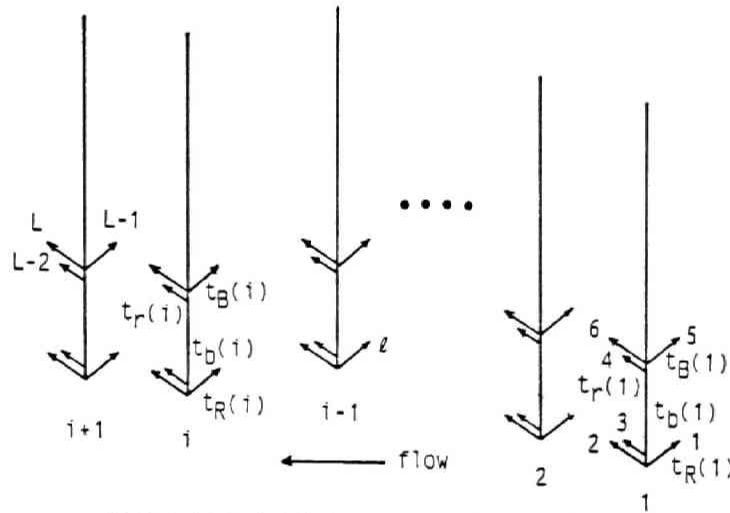


第 5.1.3 図 $x-t$ 特性曲線法による信号点減モデルの解析例

($\tau=40$ [秒], $\rho_m=0.11$ [台/m], $\rho_0=0.03$ [台/m], $u_m=16.9$ [m/s])

5.1.3 交通流の簡易的解析手順の設立

先に示したような一つの信号機しか存在しない極めて簡単な場合には、(5.1.5) 式を直接解いて解析解を求めることもできよう。しかし、信号機が数多く連なり、しかもこれらが独自に点滅を繰り返している現実的な道路状況においては、交通流状態に応じて発生・消滅する数多くの微分方程式を連立して、これを解析的に解くことは極めて煩雑で殆ど不可能であろう。そこで、図5.1.1(b)の道路状況で、衝撃波に関する数多くの微分方程式を数値解の形で解く逐次的計算手順について考察する。



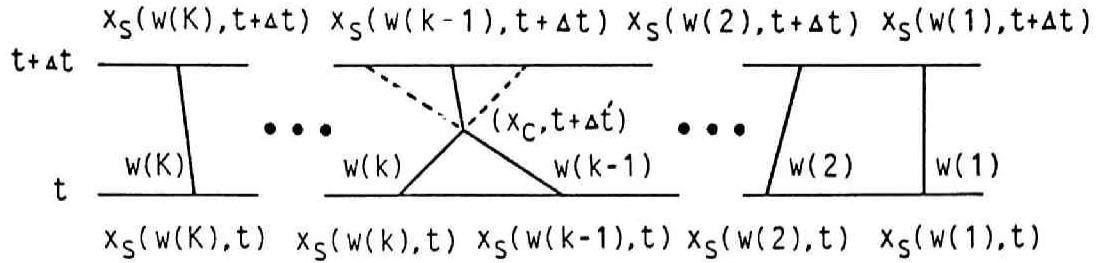
第 5.1.4 図 各交差点での初期衝撃波のモデル

まず、図5.1.4 に示すように、全ての初期衝撃波に番号を付け、これを q ($q=1, 2, \dots, l$) とする。但し、同図には図5.1.3 に示した初期衝撃波の他に、副道路からの進入車両による初期衝撃波が新たに加わっていることに注意。また、 q 番目の衝撃波の時刻 t における座標位置を $x_s(q, t)$ とする。 $x_s(q, t)$ を求めるためには、 q 番目の衝撃波の発生時刻 ($t_s(q)$)、 q 番目の衝撃波に対する右車両密度 ($\rho(x_s^-(q, t))$) 及び左車両密度 ($\rho(x_s(q, t))$) に関する情報がまず必要となる。

さて q 番目の衝撃波 $x_s(q, t)$ ($t > t_s(q)$; 衝撃波が発生状態) の挙動を時区間 $[t, t + \Delta t]$ で考察する (図5.1.5 参照)。(5.1.5) 式を差分近似すると直ちに

$$x_s(q, t + \Delta t) = (q(x_s^-(q, t), t) - q(x_s^+(q, t), t)) / (\rho(x_s^-(q, t), t) - \rho(x_s^+(q, t), t)) \times \Delta t + x_s(q, t) \quad (5.1.6)$$

となるが、(5.1.2) (5.1.3) 式を用いると上式はさらに次のようになる。



第 5.1.5 図 時区間; $[t, t+\Delta t]$ での衝撃波の振る舞い

$$x_s(q, t+\Delta t) = u_m \{ 1 - (\rho(x_s^-(q, t), t) + \rho(x_s^+(q, t), t)) / \rho_m \} \cdot \Delta t + x_s(q, t) \quad (5.1.7)$$

(5.1.6) 式または(5.1.7) 式から $x_s(q, t+\Delta t)$ が求められるが、これが他の衝撃波たとえば k 番目の衝撃波と交叉することも生じ得る。具体的には $x_s(q, t) > x_s(k, t)$ でかつ $x_s(q, t+\Delta t) \leq x_s(k, t+\Delta t)$ のときに生じ、この点で新たな衝撃波が発生する(図5.1.5 参照)。このような場合は k 番目と q 番目(一般性を失うことなく $k < q$ とする)の衝撃波の交点座標位置と時刻 ($x_c, t+\Delta t'$) を求め、新たに生じた衝撃波に対し数値の小さい方の番号 k を付与し、 $\rho(x_s^+(q, t+\Delta t'), t+\Delta t')$ と $\rho(x_s^-(k, t+\Delta t'), t+\Delta t')$ を新たな衝撃波の右および左車両密度とする。次いで衝撃波 k の時刻 $t+\Delta t$ における座標位置は、再び(5.1.7) 式を用いて次のように求められる。

$$x_s(k, t+\Delta t) = u_m \{ 1 - (\rho(x_s^-(k, t+\Delta t'), t+\Delta t') + \rho(x_s^+(q, t+\Delta t'), t+\Delta t')) / \rho_m \} \cdot (\Delta t - \Delta t') + x_c \quad (5.1.8)$$

以上の操作を全ての q ($q=1, 2, \dots, l$) について実行するには、図5.1.6(a) に示す一連の表及び発生状態となっている衝撃波の番号をセットしておく図5.1.6(b)の表(以下これを便宜のため w 表と呼ぶこととする)を用意して次の計算手順に従えばよい。

Step 1. 図5.1.6(a)に示す表(以下これらの表を x_t 表, $x_{t+\Delta t}$ 表, ρ^+ 表, ρ^- 表, t_s 表と呼ぶ)にまず初期値を設定する。

Step 2. t_s 表を調べて時刻 t で初めて発生状態となる衝撃波があれば、既にセットされている w 表の番号にそれらの番号を追加し、 $x_s(w(k), t)$ ($k=1, 2, \dots, l$) の値が小さい順となるように並べ替えてそれらの衝撃波番号を w 表にセットし直す。

Step 3. w 表を参照しながら(5.1.6)式または(5.1.7)式を用いて $x_s(w(k), t+\Delta t)$ ($k=1, 2, \dots, K$) を計算し, これらの値を $x_{t+\Delta t}$ 表にセットする。衝撃波同士の交叉が生ずれば(5.1.8)式によって再度計算し, 大きい値をもつ衝撃波番号のほうを w 表から削除してこの分だけ w 表をつめておく ($K \leftarrow (K-1)$)。

Step 4. $x_{t+\Delta t}$ 表の内容を x_t 表に移し, $t+\Delta t$ を t と置き直して Step 2. に戻る。

上記の手順を用いて交通流状態を予測するための最小限必要なデータは次のとおりである。

- 1) 道路システムパラメータ：各信号間の距離及び, 着目する特定信号機の点滅時刻を基準とした相対的な各信号の点滅時刻 ($t_a(l), t_b(l), t_c(l), t_d(l); l=1, 2, \dots$)
- 2) 交通流パラメータ：主道路の最大平均速度 (u_m ; 制限速度等から予め人為的に与えることも出来よう), 主道路の最大車両密度 (ρ_m ; 車種混入率等によって影響を受ける⁴⁾), 及び交通流が定常状態になったときの各信号間の主道路及び副道路に対する車両密度 (ρ^+ 表及び ρ^- 表の初期値)

	x_t	$x_{t+\Delta t}$	ρ^+	ρ^-	t_s
1					
2					
l					
\vdots					
L					

(a)

	w
1	
2	
$k-1$	
k	
K	

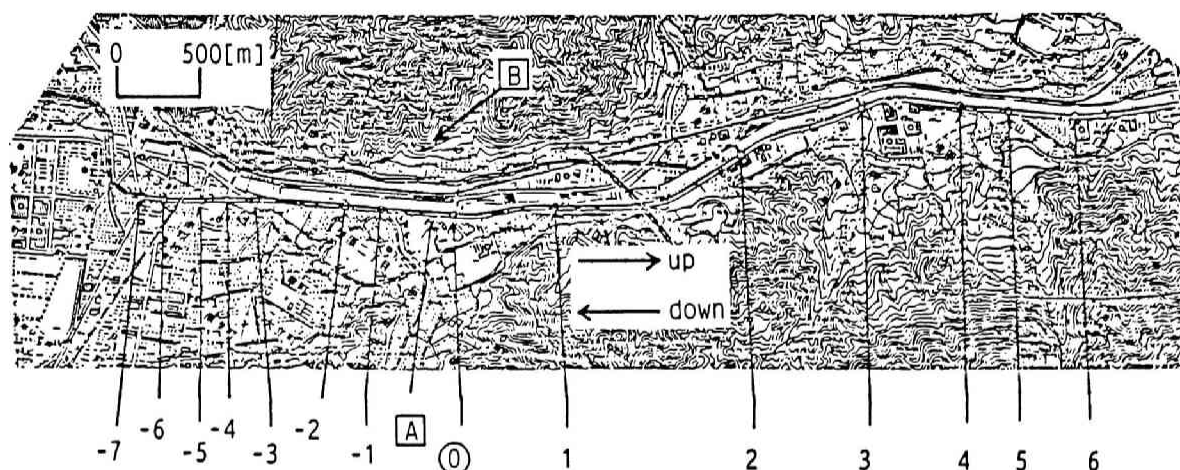
(b)

第 5.1.6 図 衝撃波の解析アルゴリズムのための諸テーブル

5.1.4 計算手順の実道路への適用

図5.1.7 は, 騒音測定点 A 及び, 交通流状態を観測するためビデオカメラを設置した点 B を中心にして, これに最も近い信号機⑩の周期時間 ($T=189$ [秒]) 内で, 信号機⑩の近辺に到達すると思われる領域の道路状況を示したものである (§ 2.1.3 で実測した道路状況を広範囲に示したものである)。図中の番号を付した信号機の周期はすべて 189[秒]であ

ったが、赤・青の表示時刻はまちまちであった。また押しボタン式および半感光式信号機は除外している。



第 5.1.7 図 実測道路状況（数値は信号機の位置を示す，A;騒音観測点，
B;ビデオカメラの設置点）

信号の46周期分の時間にわたって交通流状態を撮影し、このデータを統計処理することによって得た結果をまとめると次の通りである。

- 1) 車両の渋滞および自由走行シーンのみを選んで、車両最大密度 (ρ_m) と最大平均速度 (u_m) を求めると次の値となった（この国道の制限速度は 50[km/h]である）。

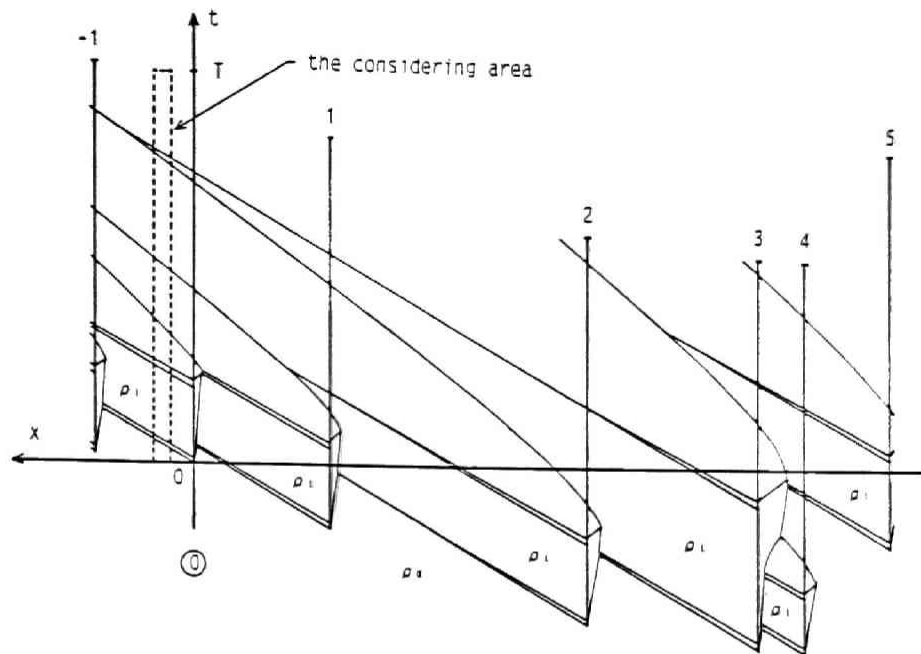
$$\rho_m = 0.094 \text{ [台/m]}, \quad u_m = 16.1 \text{ [m/sec]} (=58.0 \text{ [km/h]}) \quad (5.1.9)$$

第 5.1.1 表 観測された信号一周期当たりの交通量に対する度数分布

class	[15,20]	(20,25]	(25,30]	(30,35]	(35,40]	(40,45]
down lane	2	3	9	19	11	2
up lane	0	7	13	20	5	1

- 2) 上り・下り車線ともに、信号一周期あたりの交通量はランダムな値となる。§ 4.2.4 の考察と同様に、この交通量に対して各階級を設定して観測された値が各階級におちる

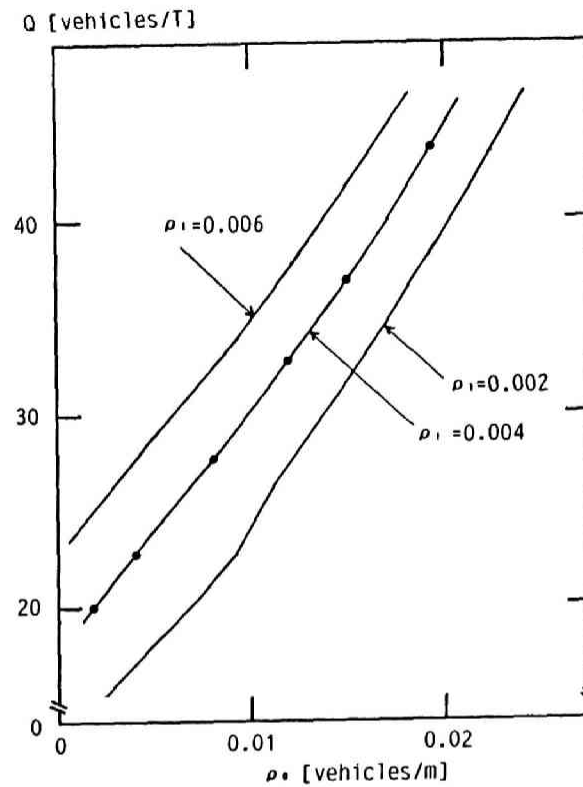
度数分布を表5.1.1 に示す。但し，上下車線とも2車線を有しており，表中には平均値を示した。



第 5.1.8 図 x-t 特性曲線法による解析例（下り車線）

$((\rho_0, \rho_1)=(0.008, 0.004), Q=27.5)$

さて，§ 5.1.3 の計算手順を適用して，下り車線の各階級での交通流状態を予測・推定することを考える（上り車線の場合も全く同様である）。まず，信号機①の位置を空間座標の原点，赤を表示する時刻を時間座標の原点としてその他の信号機の位置・信号の点滅時刻を定めた。交通流状態の大略的傾向を把握するため，信号機が赤を表示する以前の主道路交通流状態は車両密度が ρ_0 の定常流，副道路からの進入交通流状態は車両密度が ρ_1 の定常流であると仮定した。この仮定の導入によりパラメータ (ρ_0, ρ_1) の値を設定して衝撃波の軌跡を算定することができる。図5.1.8 は，上のパラメータの値を $(\rho_0, \rho_1)=(0.008, 0.004)$ としたときの衝撃波の軌跡を描いたものである。同図から，信号周期当たりの交通量 Q [台/($T \cdot$ 車線)] の値が約27.5として求められる。 (ρ_0, ρ_1) の様々な値の組み合わせと Q との関係の一部を図示したのが図5.1.9 である。 Q の値が表5.1.1の各階級値と一致するように ρ_0 の値を図5.1.9 から読み取るとそれぞれ次のようになる。但し，問題がいたずらに複雑化することを避けるため，ここでは全ての場合に対して $\rho_1=0.004$ であると仮定した。また，表5.1.1のデータのうち，区間[15, 20]におちる二つの観測値はともに20.0であったことから，この区間に限り階級値を $Q=20.0$ とした。



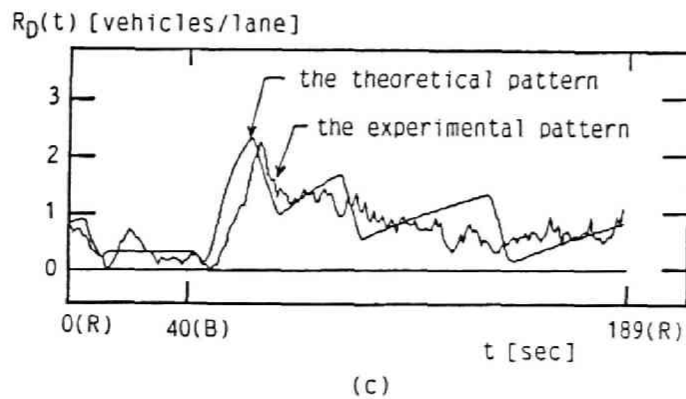
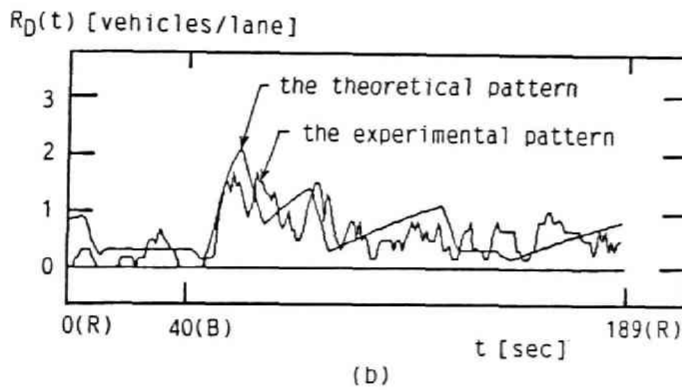
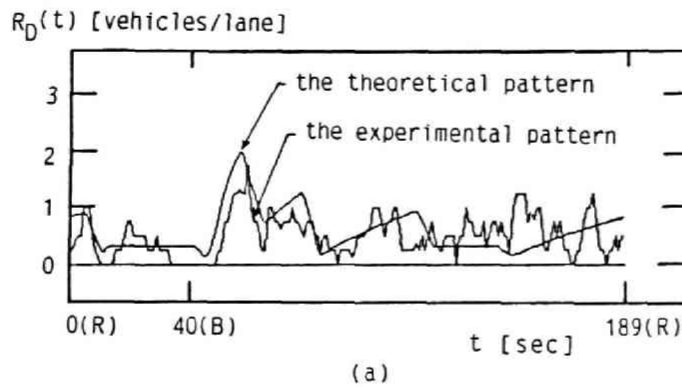
第 5.1.9 図 車両密度 (ρ_0, ρ_1) と流量 Q との関係 (下り車線)

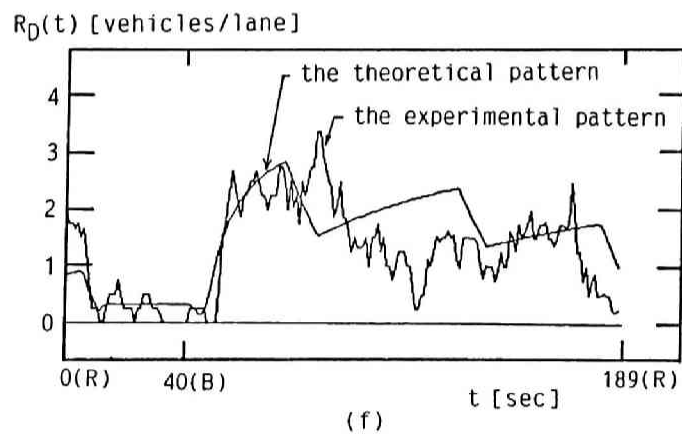
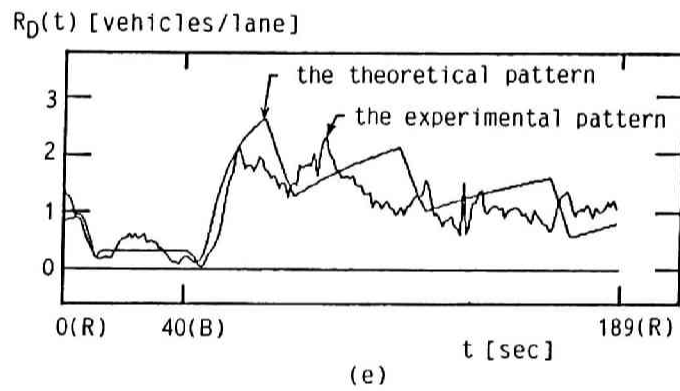
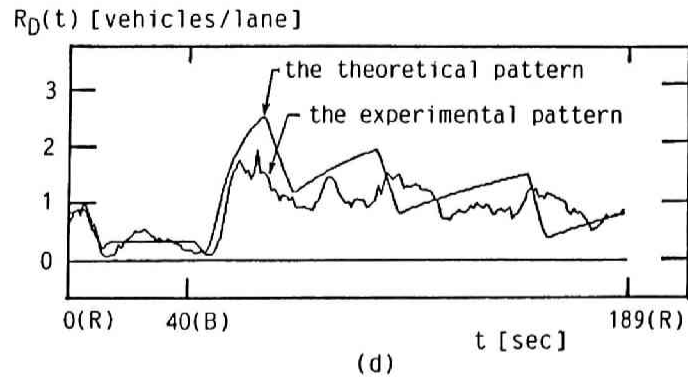
$$\begin{aligned}
 Q &= 20.0, & \rho_0 &= 0.002 \\
 Q &= 22.5, & \rho_0 &= 0.004 \\
 Q &= 27.5, & \rho_0 &= 0.008 \\
 Q &= 32.5, & \rho_0 &= 0.012 \\
 Q &= 37.5, & \rho_0 &= 0.015 \\
 Q &= 42.5, & \rho_0 &= 0.019
 \end{aligned}$$

(5.1.10)

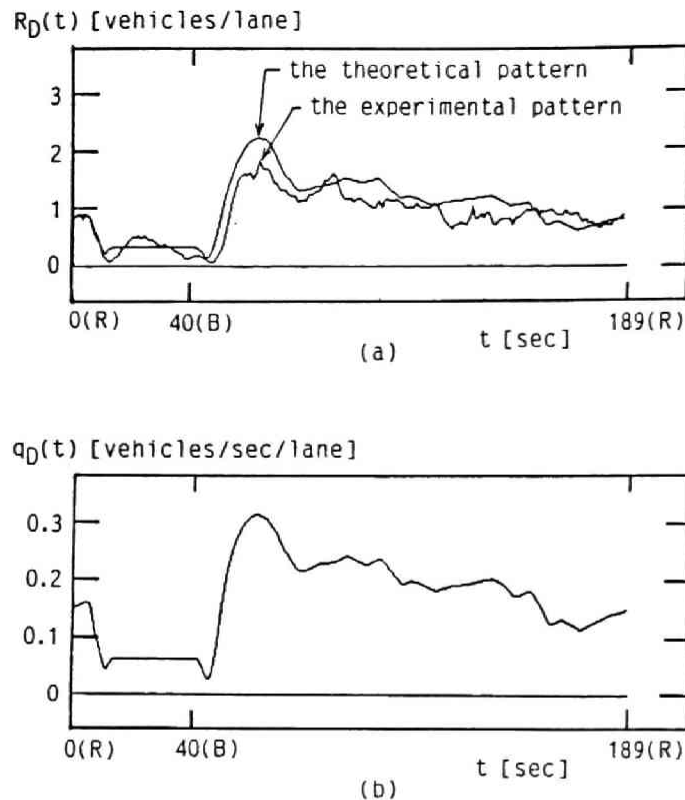
上記の値を用いることによって、各場合に対する図5.1.8と同様な($x-t$)特性曲線が得られる。これらの図から道路対象区間内(ビデオカメラによる撮影範囲に限界があるため図5.1.7のA点を中心に $[+35, -45\text{m}]$ を対象区間とした)に存在する各時刻ごとの平均車両台数 $R_0(t)$ を求めることができる。具体的には、上記の特性曲線から得られる $\rho(x, t)$ の数値を用い、考察対象区間にわたって空間的に数値積分すればよい。各階級での $R_0(t)$ の時間的変動パターンと実測値との比較を行ったものが図5.1.10(a)~(f)である。各場合とも、理論的変動パターンは実測データの大略的傾向を捉えており、これまでに述べた交通流モデ

ルの妥当性と設立した計算手順の正当性の一端がうかがわれる。図5.1.10(a)～(f)の理論的パターンを表5.1.1の重みで荷重平均し、これと信号46周期の時間にわたって測定した実測変動パターンを比較したのが図5.1.11(a)である。両者はかなりよく一致しており、信号機⑩（図5.1.7 参照）の点滅による影響が明確に現れている。図5.1.11(b)は各時刻における車両密度と速度の積で与えられる平均流量（1秒当たりの平均交通量） $q_0(t)$ [台/(秒・車線)]を理論的に求めて図示したものである。





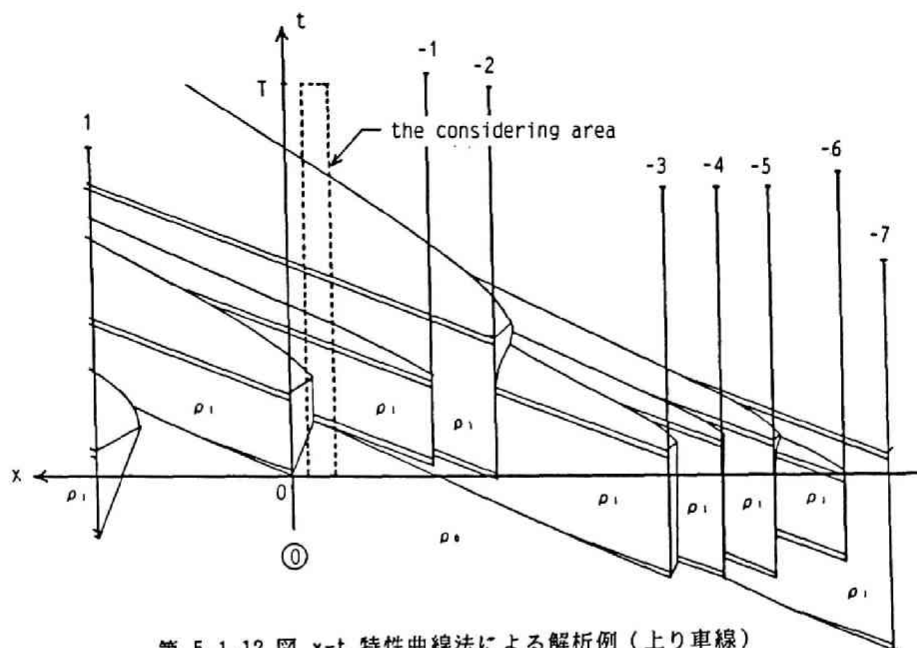
第 5.1.10 図 考察対象領域 (A 点を中心に [35, -45 m]) における各階級での存在車両台数の変動パターンに対する理論と実測との比較 (下り車線) ((a); [15, 20], (b); (20, 25], (c); (25, 30], (d); (30, 35], (e); (35, 40], (f); (40, 45])



第 5.1.11 図 考察対象領域（A 点を中心に[35,-45 m]）での重み付けによる 46 周期の交通流に対する平均的変動パターン（下り車線）（(a); 平均存在車両台数変動パターンと実測値との比較, (b); 理論的平均流量変動パターン）

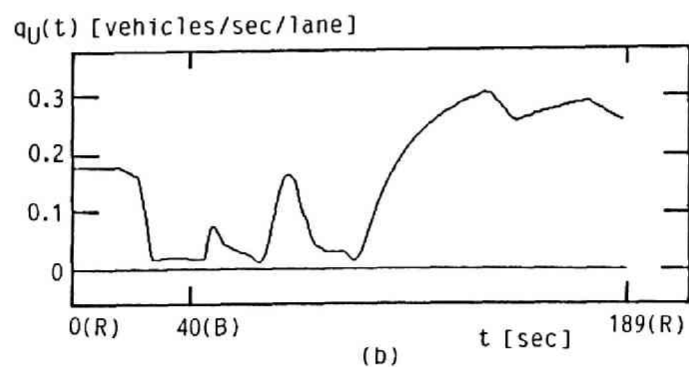
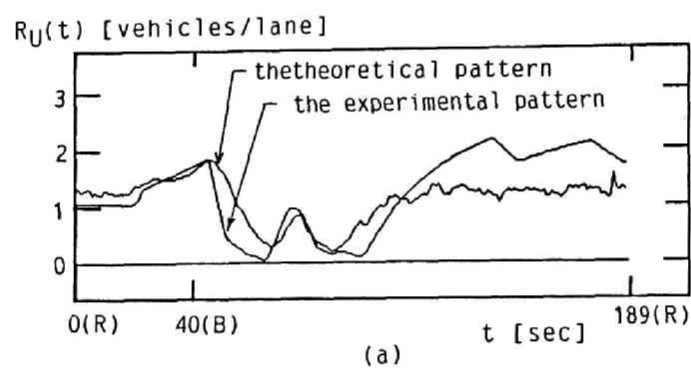
上り車線についても全く同様の考察を行えばよい。図 5.1.12 は上り車線に対する $x-t$ 特性曲線の一例を示したものであり、図 5.1.13 (a) (b) はそれぞれ 図 5.1.11 (a) (b) に対応する変動パターンである。図 5.1.13 から次のことが分かる。即ち、信号機①が赤を表示すれば、停止して連なっている車両がカウントされることにより、対象区間内の存在車両台数は増加するが（図 5.1.13 (a)）、この時の平均速度は極めて小さいから、結果的に平均流量は小となる（図 5.1.13 (b)）。特に、図 5.1.11 (a) と図 5.1.13 (a) から見られるように、上り・下り車線とも、理論的推定パターンは実測データの大略的傾向を捉えている点には注目すべきであろう。

図 5.1.14 (a) (b) は、4.1 節での考察と同様に、道路対象区間を騒音観測点 A を中心に [+57, -57m] にまで拡張し、この区間に存在する上・下車線全体の平均車両台数 $R(t) (=R_D(t) + R_U(t))$ と平均流量 $q(t) (=q_D(t) + q_U(t))$ を理論的に求めてそのパターンを描いたものである。

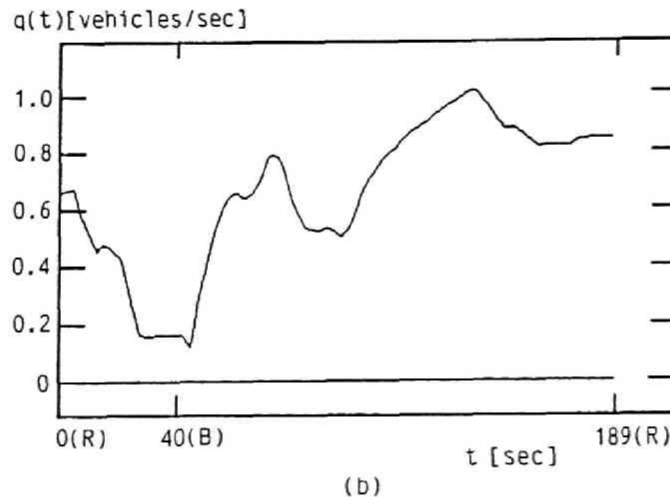
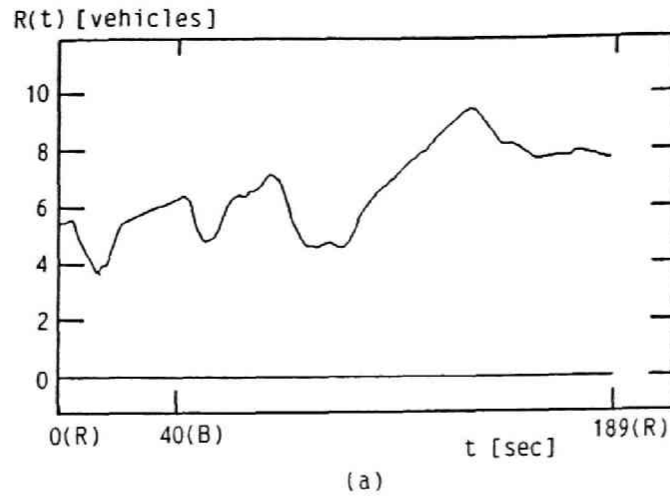


第 5.1.12 図 x-t 特性曲線法による解析例（上り車線）

$((\rho_0, \rho_1) = (0.014, 0.0008), Q = 27.0)$



第 5.1.13 図 考察対象領域（A 点を中心に [35, -45 m]）での重み付けによる 46 周期の交通流に対する平均的変動パターン（上り車線）（
（a）; 平均存在車両台数変動パターンと実測値との比較, (b); 理論的
平均流量変動パターン）



第 5.1.14 図 考察対象領域（A 点を中心に[57,-57 m]）での理論的交通変数の変動パターン（上・下車線全体）（(a);平均存在車両台数の変動パターン,(b);平均流量の変動パターン）

5.1.5 騒音レベル分布の推定結果

道路考察区間内に存在し、かつ走行している平均車両台数の信号一周期にわたる変動パターン $\mu_N(t)$ が何らかの方法で一旦求められれば、これを用いて長時間スケールにおける騒音レベル分布は次式によって推定可能となることを既に4.1節で考察している。

$$p(L) = g(L; \mu_{L0}, \sigma_L^2) \sum_{n=0}^{\infty} A_n H_n((L - \mu_{L0})/\sigma_L),$$

$$A_m = 1/(m! \sigma_L^m) / T \cdot \int_0^T [\mu_L(t) - \mu_{L0}]^m dt, \quad (5.1.11)$$

$$g(L; \mu_{L0}, \sigma_L^2) \triangleq 1/(2\pi \sigma_L^2)^{1/2} \cdot \exp\{-(L - \mu_{L0})^2 / 2\sigma_L^2\},$$

$$\mu_{L0} = 1/T \cdot \int_0^T \mu_L(t) dt, \quad \sigma_L^2 = 1/T \cdot \int_0^T \sigma_L^2(t) dt$$

$$\mu_L(t) = M \cdot \ln[(\alpha_1 \mu_N(t))^2 / (\alpha_2 \mu_N(t) + (\alpha_1 \mu_N(t))^2)^{1/2}],$$

$$\sigma_L^2(t) = M^2 \cdot \ln[(\alpha_2 \mu_N(t) + (\alpha_1 \mu_N(t))^2) / (\alpha_1 \mu_N(t))^2], \quad (5.1.12)$$

$$M=10/\ln 10$$

ここに、 α_1 と α_2 はそれぞれ上記の μ_N と観測点における音の強さに関する平均値および分散との間の回帰係数($\mu_L(t) = \alpha_1 \mu_N(t)$, $\sigma_L^2(t) = \alpha_2 \mu_N(t)$)である(4.1節参照)。

本節においても、これと同一の路線をとり、次の二つの回帰関係を考察する(図5.1.14(a)(b)参照)。

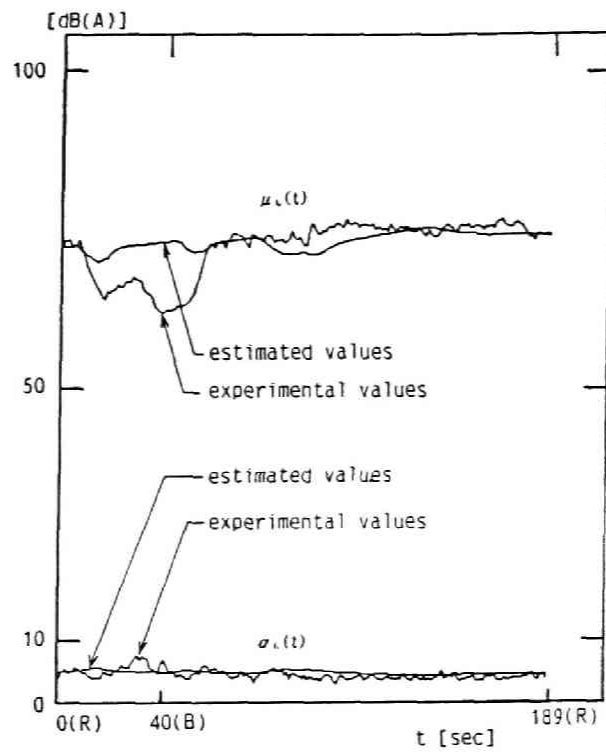
$$\text{Case I: } \mu_L(t) = a_1 R(t), \quad \sigma_L^2(t) = b_1 R(t) \quad (5.1.13)$$

$$\text{Case II: } \mu_L(t) = a_2 q(t), \quad \sigma_L^2(t) = b_2 q(t) \quad (5.1.14)$$

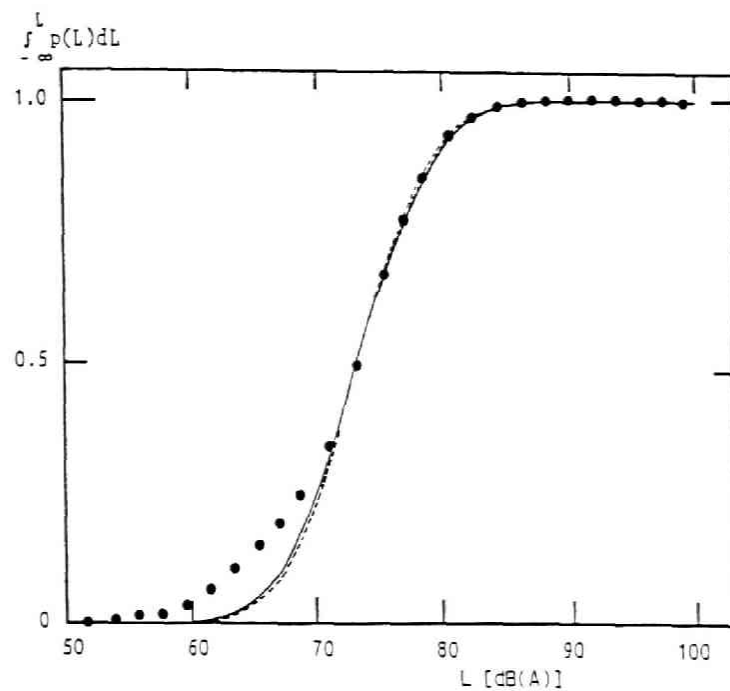
道路騒音の実測データを用いて各回帰係数を求めると次の値を得た。

$$a_1 = 0.127 \times 10^8, \quad b_1 = 0.128 \times 10^{16}, \quad (5.1.15)$$

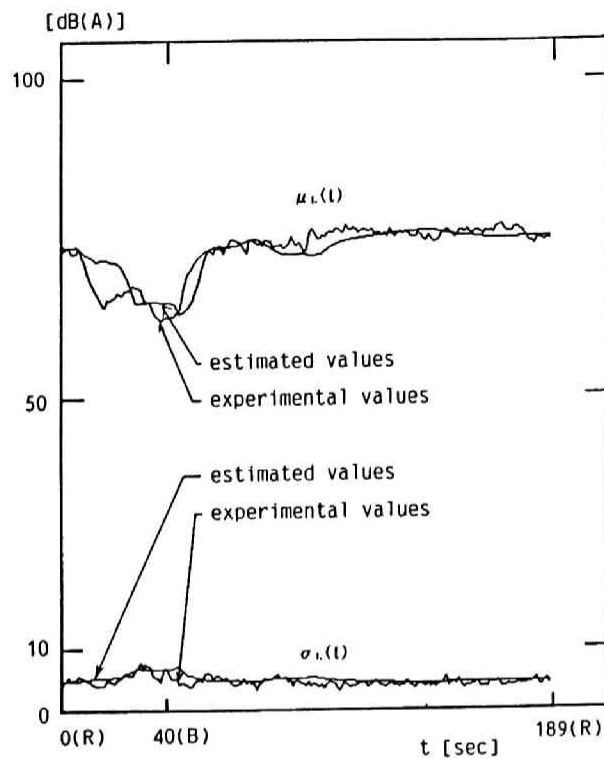
$$a_2 = 0.126 \times 10^9, \quad b_2 = 0.122 \times 10^{17}$$



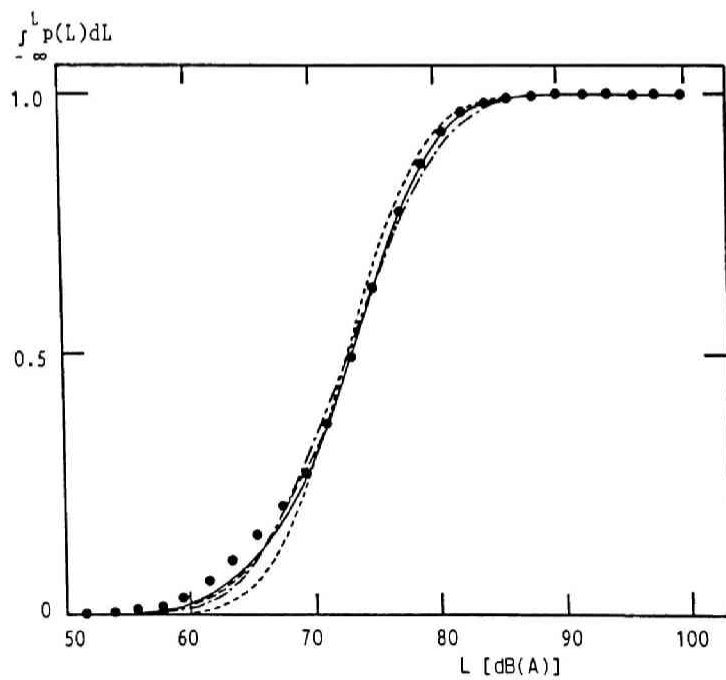
第 5.1.15 図 $\mu_L(t), \sigma_L(t)$ に対する理論値と実測値との比較 (Case I)



第 5.1.16 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較 (Case I)
 (●) ; 実測値, 理論的曲線: [······ ; 初項($m=0$), ——— ;
 第一項近似曲線($m=2$), 第二項近似曲線($m=3$), 第三項近似曲線($m=4$)]



第 5.1.17 図 $\mu_L(t), \sigma_L(t)$ に対する理論値と実測値との比較 (Case II)

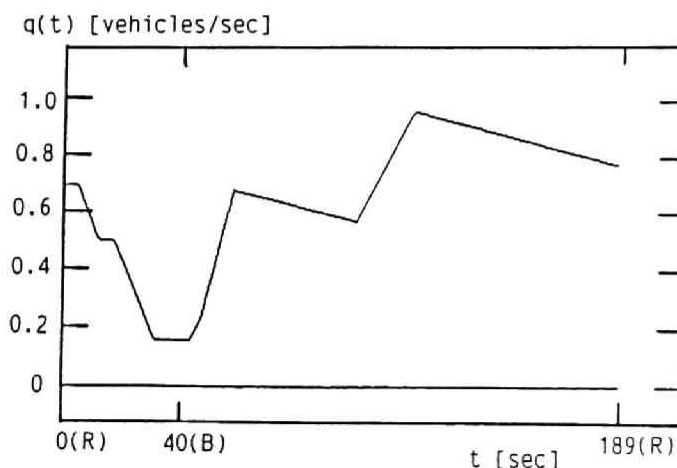


第 5.1.18 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較 (Case II)

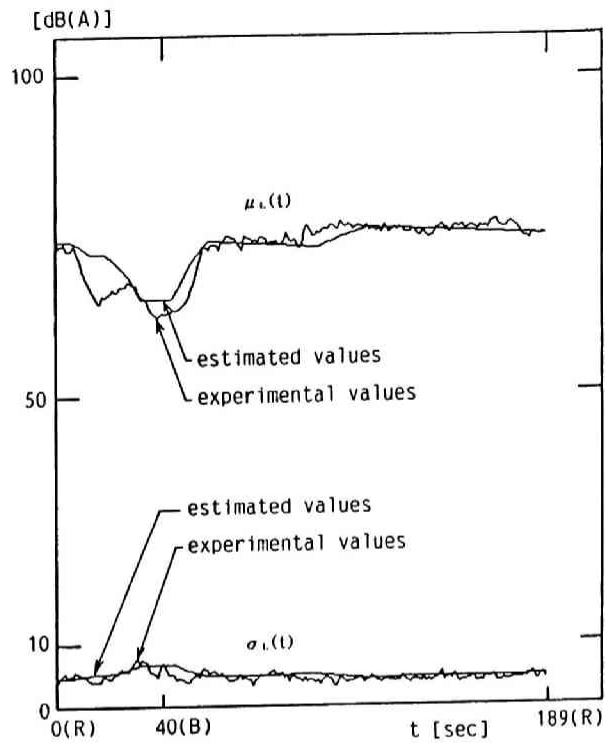
((●) ; 実測値, 理論的曲線: [..... ; 初項($m=0$), - - - - ;
第一項近似曲線($m=2$), - . - . ; 第二項近似曲線($m=3$), ——— ;
第三項近似曲線($m=4$))

(5.1.12)式及び(5.1.13)式を用いて $\mu_L(t)$ と $\sigma_L(t)$ を理論的に推定し、実測パターンと比較したものが図5.1.15である。また、この推定パターンを用いて(5.1.11)式から騒音レベル分布を求め、実測データとの比較を行ったのが図5.1.16である。 $R(t)$ のパターンを用いる場合は、赤信号によって停止している車両まで考慮されてしまうことから、特に低レベル付近における分布推定に大きな誤差を生じることが分かる。(5.1.14)式を用いた場合の $\mu_L(t)$ と $\sigma_L(t)$ に対する推定結果が図5.1.17であり、レベル分布推定結果が図5.1.18である。分布関数の展開項を付加すると実験的標本値をよく捉えており、推定誤差はかなり改善され、最大誤差は約1[dB(A)]程度となっていることが分かる。即ち、実質的な騒音発生源は実際に走行している車両のみであり、信号待ち車両の発生騒音は走行車両のそれに比して極めて小さいことを物語っている。

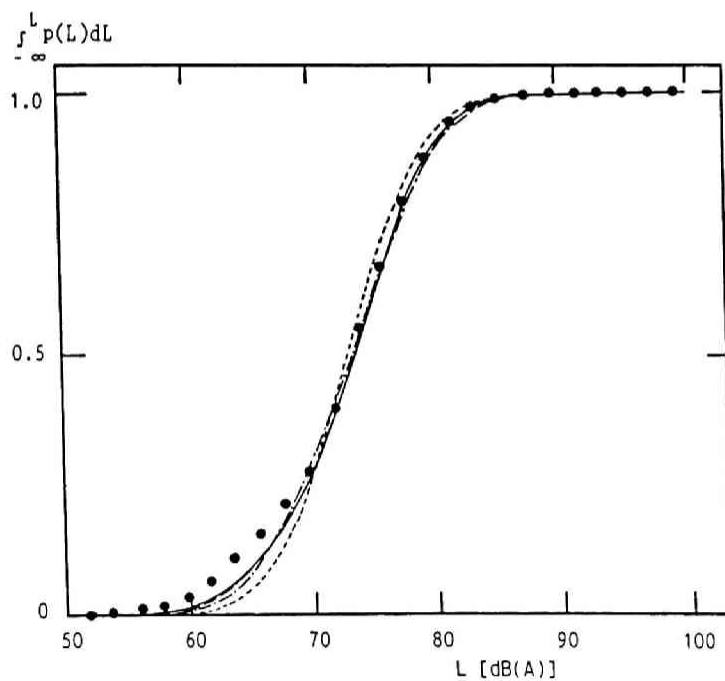
§4.1.4での考察同様、(5.1.11)式の展開係数 A_n は $[\mu_L(t) - \mu_{L0}]^n$ に関する積分値で与えられるから、 $\mu_L(t)$ の微細な差異がそのままレベル分布形状に敏感に影響せず、従って、 $\mu_L(t)$ (又は $q(t)$)の変動パターンを思い切って単純化することができる。即ち、表5.1.1で示した各階級値毎の変動パターンを求めてこれらを荷重平均するといったきめ細かなやり方ではなく、上・下車線の平均交通量がそれぞれ30.8、31.8であるとの情報から一挙に平均流量変動パターンを理論的に推定し、更にこれを幾つかの直線で近似することも考えられる。この場合の上・下車線全体の $q(t)$ に対する近似化パターンを図5.1.19に示す。これを用いて $\mu_L(t)$ と $\sigma_L(t)$ とを推定した後(図5.1.20参照)、理論的騒音レベル分布を描いて実測値との比較を行ったものが図5.1.21である。図5.1.19のような思い切った近似化にもかかわらず、理論的分布曲線は実測値を可成りよく捉えている。



第 5.1.19 図 上下車線全体での流量の近似化パターン



第 5.1.20 図 $\mu_L(t), \sigma_L(t)$ に対する理論値と実測値との比較
(近似化パターン)



第 5.1.21 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較 (近似化パターン)
((●) ; 実測値, 理論的曲線: [- - - - - ; 初項(m=0), - · - · - ;
第一項近似曲線(m=2), — — — ; 第二項近似曲線(m=3), —————
; 第三項近似曲線(m=4)])

5.1.6 結言

本節で考察した事項とその結果を要約すると次の通りである。

(1) 周期的点滅を繰り返す信号機周辺の道路騒音レベルの分布推定・予測を行うことを目的に、まず、騒音発生源である交通流状態を理論的に推定することを考えた。具体的には、流体力学的モデルを採用して、交通工学的な状態変数を推定するための簡便で可成り一般的な逐次的計算アルゴリズムを設立した。

(2) (1) のアルゴリズムの正当性と有効性を確認するため、実道路の交通流状態推定問題に適用した。即ち、多くの信号機が連なる現実の道路に着目し、その交通流状態変数、特に考察道路区間内に存在する平均車両台数の信号一周期にわたる変動パターンを推定し、実測データとの比較を行った。その結果、可成りよい一致が認められた。

(3) 上記の実験的検証を踏まえ、騒音観測点に影響を及ぼすと思われる道路長にまで考察区間を拡張し、その内に存在する平均車両台数および平均流量に関する時間的変動パターンを推定した。これらのパターンを用いて騒音レベル分布を描き、実測騒音データとの比較を行った。

(4) その結果、存在する平均車両台数の変動パターンを用いたのでは、赤信号による停止車両までカウントされることから、レベル分布の推定に大きな誤差が生じることが明らかとなった。この推定誤差を改善するには、平均流量のパターンを用いればよい。即ち、交通工学的に推定される変量は第4章で考察した平均走行車両台数ではなく平均流量である（定常状態では両者は一致してくることに注意）。

(5) 騒音レベル分布の推定に当たっては、上記の平均流量に関する変動パターンを思い切って単純化しても推定精度はさほど悪化しない。従って、変動パターンの推定に関して、手順の実用性を目指した簡略化をはかることもできる。特に、信号一周期あたりでの流量情報から信号一周期内での交通流状態変数の大略的推定が可能となり、発生騒音のレベル分布推定が可能となる点には留意を要する。この考察結果に基づく簡易な騒音レベル分布予測手法は第6章で詳論する。

本節では、騒音発生源としての交通流の推定問題に考察の主点を置いたことから、次に列記する問題点が残されている（これらの問題は次節（5.2 節）で考察する）。

(1) (5.1.13)（または(5.1.14)）式の回帰係数の設定に実測騒音データを用いているが、純理論的な騒音レベル分布の推定として一貫させるため、実測データを用いずに回帰係数を求めること。

(2) レベル分布推定の実用化をはかるため、(5.1.11)式の級数展開形分布表現を簡略化

すること。

この節の引用文献

- 1) 加藤裕一, 山口静馬; “交通流状態変数の推定法と騒音レベル分布予測への応用,” 日本音響学会誌, 46(6), 458-467 (1990).
- 2) R. Harberman; Mathematical Model: Traffic Flow (Prentice Hall, New York, 1977)
- 中井 久訳, 交通流の数学モデル (現代数学社, 京都, 1981) .
- 3) 藤田大二; 交通現象と交通容量 (技術書院, 東京, 1987) .
- 4) 佐々木實, 山下充康; “道路特殊箇所の騒音の予測に関する検討 - インターチェンジ部周辺 - ,” 日本音響学会誌, 40(9), 638-643 (1984).

付 録

$u(\rho)$ として (5.1.2) 式を用いると, 密度波と衝撃波の従う微分方程式はそれぞれ次式となる ((5.1.3), (5.1.4), (5.1.5) 式参照) 。

$$dx/dt = dq/d\rho = u_m (1 - 2\rho/\rho_m) \quad (\text{A-1})$$

$$dx_s/dt = u_m (1 - (\rho(x_s, t) + \rho(x_s^+, t))/\rho_m) \quad (\text{A-2})$$

さて, 図 5.1.3 に示す衝撃波軌跡の中で, 例えば AB; 信号が赤となり密度 ρ_0 の交通流が次々と到着することによって渋滞車両列 (すなわち最大密度 ρ_m) が成長していく軌跡, と CB; 信号が青となり, これまで形成されていた渋滞車両列が崩れていく軌跡, の従う微分方程式は, (A-2) 式を用いて次のように与えられる。

$$\text{AB: } dx_s/dt = u_m (1 - (\rho_m + \rho_0)/\rho_m) \quad (\text{A-3})$$

$$\text{CB: } dx_s/dt = u_m (1 - (\rho_m + \rho_m)/\rho_m) \quad (\text{A-4})$$

点 A, C の各座標値を初期値として (A-3), (A-4) 式を解くと

$$AB: x_s = -u_m \cdot \rho_0 / \rho_m \cdot t \quad (A-5)$$

$$CB: x_s = -u_m \cdot (t - \tau) \quad (A-6)$$

となる。これらの衝撃波は、或る時間経過の後、点 B $(= (u_m \rho_0 \tau / (\rho_0 - \rho_m), \rho_m \tau / (\rho_m - \rho_0)))$ で交差する。即ち、渋滞車両列 (ρ_m) が全て崩れた後の車両密度と密度 ρ_0 で流れ込む車両との間に新たな衝撃波 BD が生じることとなり、これが従う微分方程式は次式で与えられる。

$$BD: dx_s/dt = u_m (1 - (\rho_m + \rho_t) / \rho_m) \quad (A-7)$$

ここに、

$$\rho_t = \rho_m (1 - x / (u_m (t - \tau))) \quad (A-8)$$

である (ρ_t 領域における任意の (x, t) 上での密度波が、(A-1) 式より、 $(x-0)/(t-\tau) = u_m (1 - 2\rho_t / \rho_m)$ で与えられるから、これを ρ_t について解けば (A-8) 式が求まる)。点 B の座標値を初期値として (A-7) 式を解くと次のようになる。

$$BD: x_s = -2u_m / \rho_m \cdot \{\rho_0 (\rho_m - \rho_0) \tau (t - \tau)\}^{1/2} + u_m (1 - 2\rho_0 / \rho_m) \cdot (t - \tau) \quad (A-9)$$

他の衝撃波についても同様にして求めることができる。

5. 2 交通量時間率に基づく分布予測¹⁾

5.2.1 緒言

前節（5.1 節）では、流体力学的交通流理論²⁾を援用して、信号機が数多く連なり周期的に点滅を繰り返す道路状況での状態推定問題を理論的に解析する手順に主眼を置いて考察し、実道路に適用してその正当性を実験的に確認した。更に、推定された状態変数のうち平均流量の変動パターンを用いて、目的とするレベル分布の推定が可能となることを示し、交通流の状態推定を行い騒音予測問題を考察することの有効性も併せ確認した。

しかしながら、次に示す二つの問題点が残されていた（§5.1.6 参照）：

1) レベル分布予測の基盤となる確率密度関数は無限級数展開形表現となっており、具体的適用に当たって、何項まで採用すればよいかの問題となる。即ち、無限級数展開の形でなく、まとまった分布表現を用いることが出来るのであれば、騒音予測手法は更に有効性を増すことは明らかである。

2) 分布表現を具体化するには、例えば平均流量と各音の強さに関する統計量との回帰関係を設定し、騒音レベル統計量（平均値や分散等）の変動パターンをまず与えて置く必要があるが、この回帰関係の設定に実測データを用いていた。即ち、純粹に騒音を予測するためには予め回帰関係を与えて置く必要がある。

本節では、実測騒音データを途中で用いることのない騒音予測手法とするため、上記の二つの問題点の解決を試みる。具体的には、騒音レベル変動の周期的非定常特性を引き起こす各種レベル統計量の時間的変動は、各統計量ごとに個々に独立して全く自由に変化するのではなく、各統計量とも共通して、騒音発生源である走行車両の平均流量（1秒当たりの平均交通量）と言った、ただ一つの交通流状態変数に大きく依存していることにまず着目する（5.1 節参照）。そして、この平均流量の或る値をとる時間率を用いたガウス形重み付き加算分布表現を提案することによって、第1の問題の解決を試みる。次に、シミュレーション手法を適用して、第2の問題点の解決を試みる。即ち、5.1 節での考察結果より既に得られている、平均車両密度と平均車両速度の変動パターン及び、車種混入率を与えれば 4.2 節で考察した計算機シミュレーション手法により騒音レベルデータを発生させることができる。従って、道路騒音の音の強さに関する各種統計量と平均流量との回帰関係が実測データを用いることなく見いだすことが可能となる。結局、途中で実測データを

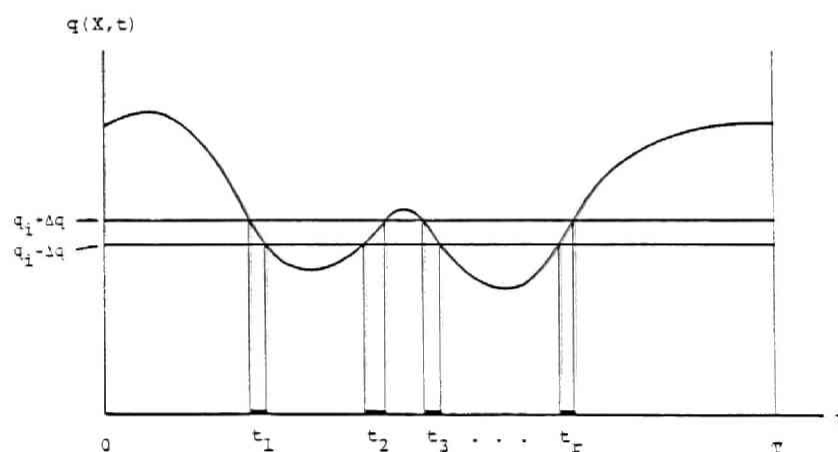
用いることのない騒音レベル分布の純予測手法が可能となる。最後に、本手法の正当性と有効性を実測騒音データとの比較によって具体的に検討する。

5.2.2 交通量時間率に基づく騒音レベル分布表現

時間経過と共に任意次数のキュムラントが任意個数、互いの相関を許して確定的・確率的を問わず任意形態で変化する周期 T の周期的非定常騒音に着目する。これに対する周期 T にわたる長時間スケールでの騒音レベル確率密度関数は、近似的に次のように与えられる。

$$p(L) = \sum_i A_i p(L | \tilde{C}_i) \quad (5.2.1)$$

ただし A_i は騒音レベル変動に関する各種キュムラント量 (C_1, C_2, \dots) ($\triangleq \tilde{C}_i$) が時間 T の中で $([C_{1i} - \Delta C_{1i}, C_{1i} + \Delta C_{1i}], [C_{2i} - \Delta C_{2i}, C_{2i} + \Delta C_{2i}], \dots)$ ($\triangleq [\tilde{C}_i - \Delta \tilde{C}_i, \tilde{C}_i + \Delta \tilde{C}_i]$) の領域に入る時間の割合、即ち時間率である。



第 5.2.1 図 平均流量の変動パターンと時間率との関係 ($\beta_i = \sum_j t_j / T$)

さて、4.1 節での考察に従えば、道路騒音の音の強さに関する様々な統計量、即ちレベル統計量に連なる変量の時間的变化は、平均流量といったただ一つの交通流状態変数の時間的变化として捉えられることを既に示している。即ち、ここでも

$$X_{n,i} = \alpha_n q \quad (n=1, 2, \dots) \quad (5.2.2)$$

なる回帰式に着目する。(5.2.2)式を考慮すると(5.2.1)式は、次のように極めて簡単な表現となる。

$$p(L) = \sum_j B_j p(L | q_j) \quad (5.2.3)$$

ここに B_j は q が時間 T の中で領域 $[q_j - \Delta q, q_j + \Delta q]$ 内の値をとる時間率であり (図5.2.1参照), $p(L | q_j)$ は $K_{n,j} = \alpha_n q_j$ ($n=1, 2, \dots$) なる各次音の強さのキムラント量を持つ任意に設定可能な騒音レベル密度関数である。 $p(L | q_j)$ の関数形は全く任意であるが 5.1 節までの考察結果を考慮して、基本的な正規分布 (音の強さの分布は対数正規分布) を採用すると、(5.2.3) 式は次のようなガウス形重み付き加算分布表現となる。

$$p(L) = \sum_{j=1}^N B_j g(L; \mu_L(q_j), \sigma_L^2(q_j)) \quad (5.2.4)$$

$$g(L; \mu_L(q), \sigma_L^2(q)) \triangleq 1/(2\pi \sigma_L^2(q))^{1/2} \cdot \exp\{-(L - \mu_L(q))^2 / 2\sigma_L^2(q)\},$$

ここに,

$$\mu_L(q) = M \cdot \ln[(\alpha_1 q)^2 / (\alpha_2 q + (\alpha_1 q)^2)^{1/2}],$$

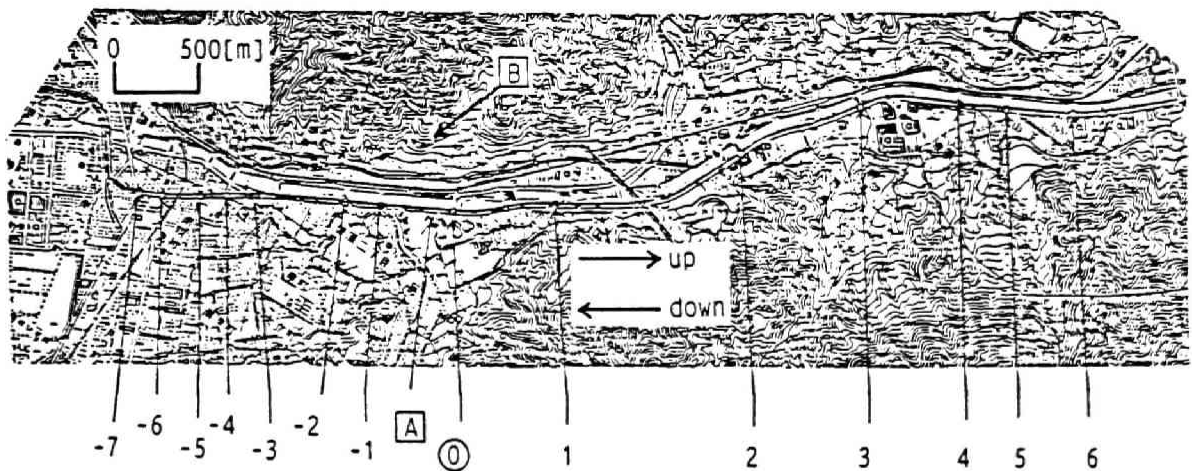
$$\sigma_L^2(q) = M^2 \cdot \ln[(\alpha_2 q + (\alpha_1 q)^2) / (\alpha_1 q)^2], \quad (5.2.5)$$

$$(M=10/\ln 10)$$

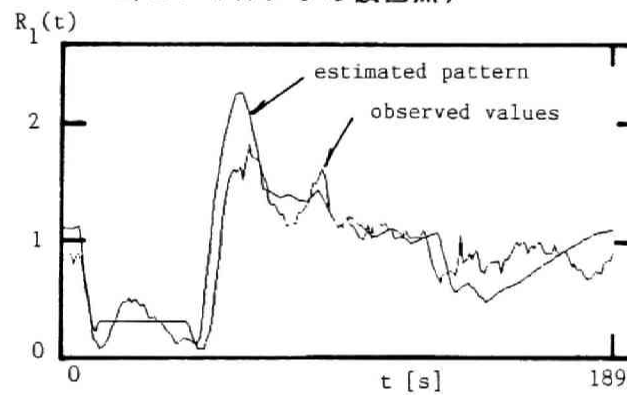
である。

5.2.3 交通流状態推定法に基づく騒音シミュレーション実験

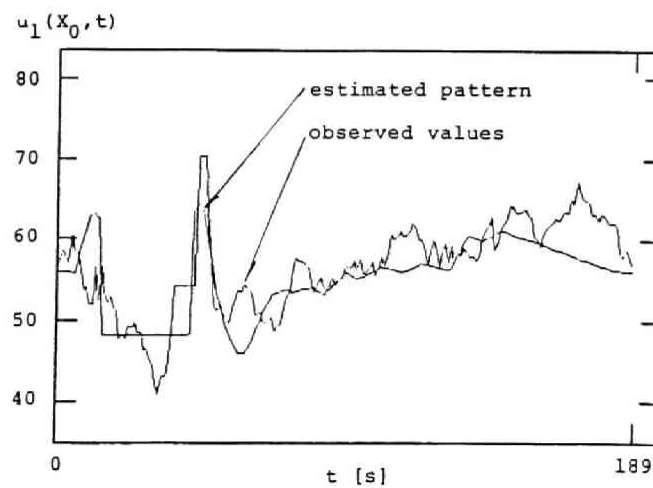
ここでの主目的は、5.1 節で考察した道路状況 (図5.2.2 参照) で、計算機シミュレーション実験を行うことによって(5.2.2)式の回帰係数 α_n ($n=1, 2, \dots$) を実測データを用いることなく設定することである。



第 5.2.2 図 実測道路状況（数値は信号機の位置を示す，A;騒音観測点，
B;ビデオカメラの設置点）



第 5.2.3 図 測定点 A を中心にした道路区間[35,-45 m]内に存在する
平均車両台数の理論的予測変動パターンと実測値との比
較（ $i=1$;下り車線，実測値は46 周期の平均）



第 5.2.4 図 測定点 A での平均車速に対する理論的予測変動パターンと
実測値との比較（ $i=1$;下り車線，実測値は46 周期の平均）

はじめに、5.1 節での交通流に対する理論的考察結果から既に状態変数の変動パターンが推定されている。一例として、下り車線での平均車両密度 ($\rho_1(t)$ と記す) と平均車両速度 ($u_1(t)$ と記す) を理論的に推定し、実測値と比較したものを図5.2.3 及び図5.2.4 に示す。但し、平均車両密度については道路区間 $[+35, -45 \text{ m}]$ 内に存在する平均車両とで比較している。これらの推定された状態変数及び車種混入率を与えれば、4.2 節での考察に従い計算機シミュレーション実験により道路騒音レベルデータを模擬発生させることができる。具体的にシミュレーション実験手順を示せば次の通りである。

Step 1. 道路の考察対象区間を設定する（具体的には A を中心に $[+57, -57\text{m}]$ とした）。

Step 2. 第 i 車線の位置 x ，時刻 t における車両密度変動パターン $\rho_i(x, t)$ を用いて時刻 t ($t=1, 2, \dots, 189$) における車両配置を決定する（ここでは上・下車線をそれぞれ 1 車線にまとめて、合計 2 車線とした ($i=1, 2$)）。即ち、図5.2.5 のように、騒音測定点 A ($x=x_0$) での $\rho_i(x_0, t)$ を用いて車頭間隔 $d_{0,i}(t) = 1/\rho(x_0, t)$ を決めると同時に初期位相 $x_{0,i}$ ($x_{0,i}$: 区間 $[0, d_{0,i}(t)]$ 内の一様乱数) によって、車両 ± 1 の位置座標 $x_{\pm 1}$ と x_{-1} を決定する。以下同様に、 $\pm j$ ($j=1, 2, \dots$) 車両の位置座標 $x_{\pm j}$ と $d_{\pm j,i}(t) = 1/\rho_i(x_{\pm j}, t)$ を用いて $\pm(j+1)$ 車両の位置 $x_{\pm(j+1)}$ を決定する。

Step 3. 車種混入率のデータと一様乱数を用いて、車両 $\pm j$ ($j=1, 2, \dots$) の車種を決定する（ここでは大型・小型の 2 車種分類によった）。車種混入率のデータとしてここでは実測値（具体的には $i=1$ （下り車線）での大型車混入率=0.30， $i=2$ （上り車線）での大型車混入率=0.25）を用いた。車種混入率は、シミュレーション実験を行う上で基本的情報として事前に与えられるべき性質のものである点には留意する必要がある。

Step 4. 第 i 車線上の車両 $\pm j$ ($j=1, 2, \dots$) が放射する音響パワー $I(i, \pm j; t)$ を決定する。具体的には、出力パワーレベルがガウス分布に従うとし、その平均値と標準偏差は次のように設定した³⁾。

大型の場合：平均値 $= 97 + 0.2 u_j(x_{\pm j, i}, t)$

標準偏差 $= 3.3$

小型の場合：平均値 $= 87 + 0.2 u_j(x_{\pm j, i}, t)$

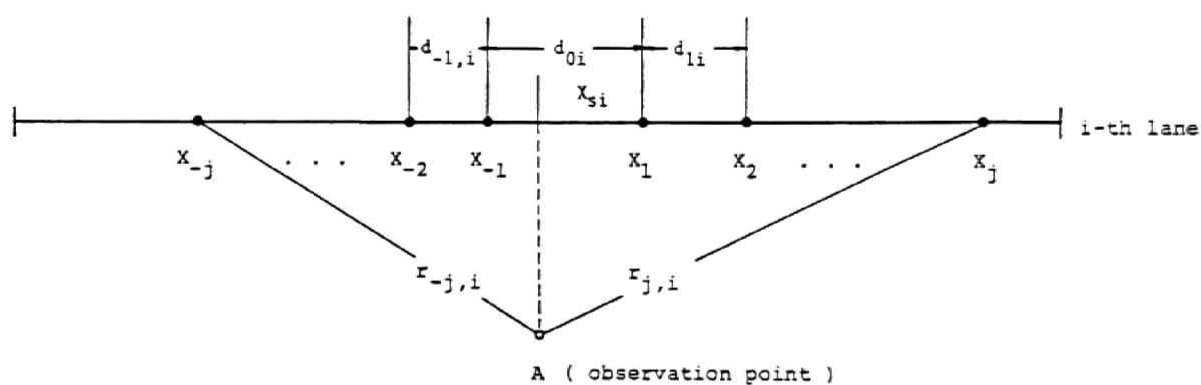
標準偏差 $= 3.6$

Step 5. 全ての車線 i ($i=1, 2$) と車両 j ($j=1, 2, \dots$) にわたってパワー合成する。即ち、

$$I_R(t) = \sum_{i,j} I(i, \pm j; t) / (4\pi r_{\pm j,i}^2)$$

Step 6. 暗騒音レベルは平均値 52 (dB(A)), 標準偏差 4(dB(A)) のガウス分布に従うと想定して, その音の強さ $I_R(t)$ を発生させる。ただし, 上記の具体的数値は騒音測定現場の状況を考慮して与えた。

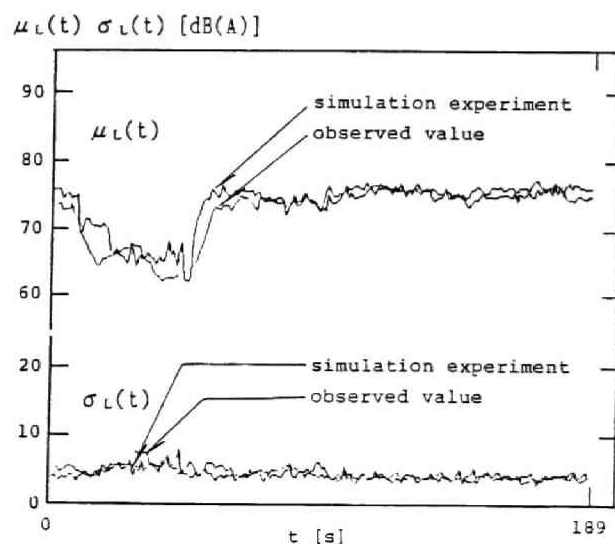
Step 7. 時刻 t ($t=1, 2, \dots, 189$)における騒音レベルを $L(t)=10\log(I_R(t)+I_B(t))$ によって算定する。



第 5.2.5 図 シミュレーション実験における車両配置図 (第 i 車線)

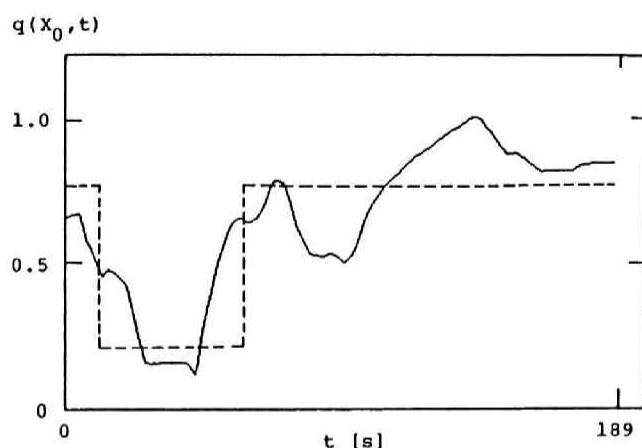
(図5.2.2 及び後に示す図5.2.7は5.1 節で既に示したものであるが説明の都合上ここに再掲した)

5.2.4 実測データによる実験的確認



第 5.2.6 図 騒音レベル変動の平均値と標準偏差に対するシミュレーション結果と実測値との比較 (実測値は46周期の実測騒音データから算出)

上記のシミュレーション実験手順によって46周期分の騒音レベル値を発生させ、これから得られた非定常騒音のレベル平均値と標準偏差に対する変動パターンを求めて、実測データとの比較を行ったものが図5.2.6である。シミュレーション結果は実測データの起伏の傾向を良く捉えている。

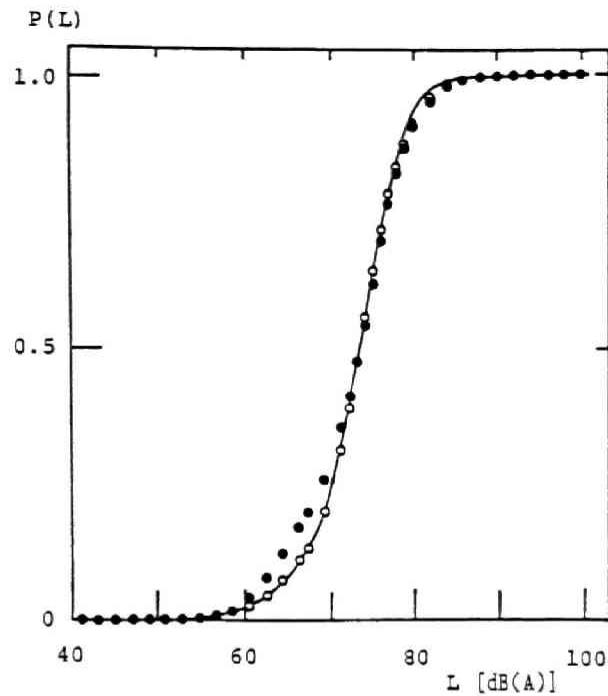


第 5.2.7 図 測定点 A における平均流量の理論的変動パターンとその直線近似

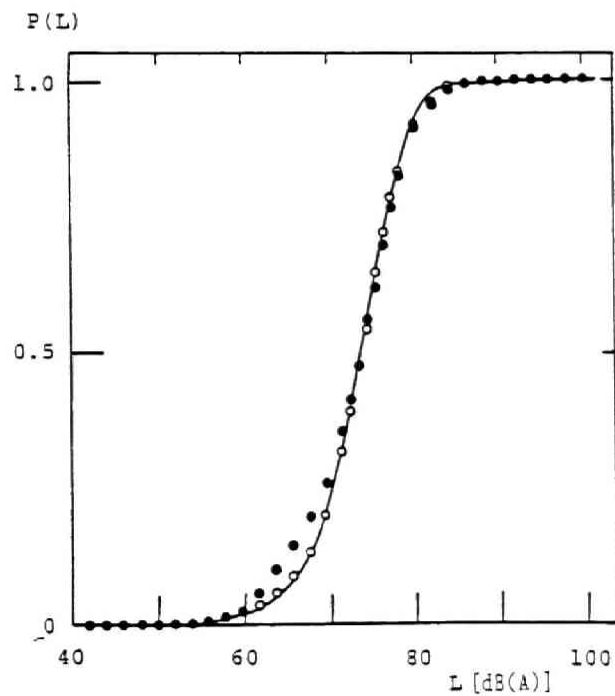
さて、上で発生させた騒音レベル値 $L(r, s)$ ($r=1, 2, \dots, 189$; $s=1, 2, \dots, 46$) と走行車両の平均流量 $q(x_0, t)$ ($t=1, 2, \dots, 189$) (図5.2.7参照) を用いて (5.2.2) 式の回帰係数を求めた結果、次の値を得た。

$$\alpha_1 = 0.573 \times 10^{-8}, \quad \alpha_2 = 0.320 \times 10^{-10} \quad (5.2.6)$$

平均流量 $q(x_0, t)$ に関する区間幅を $\Delta q=0.1$ ((5.2.3) 式及び図5.2.1 参照) なる値に設定して時間率を求めた後、(5.2.4) ~ (5.2.6) 式 ((5.2.4) 式の項数 $N=5$) を用いて騒音レベル分布を予測し、実測データとの比較を行ったものが図5.2.8 である。低レベル値付近で若干のずれは認められるものの、全体としては理論的予測曲線は実測値をかなり良く捉えていると言える。更に、予測手法の実用化をねらって、平均流量 $q(x_0, t)$ の変動パターンを思い切ってただ二つの値のみで直線近似し (図5.2.7 の破線参照)、騒音レベル分布関数を2個のガウス分布の重み付き加算表現 ((5.2.4) 式の項数 $N=2$) で与えた場合の予測結果を図5.2.9 に示す。同図から、平均流量の変動パターンをかなり単純化しても良好な騒音予測結果の得られることが分かる。



第 5.2.8 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較 (——— ; 理論的
予測曲線(N=5), (●); 実測値, (○); シミュレーション実験によ
る予測値)



第 5.2.9 図 騒音レベル分布に対する理論と実験との比較 (——— ; 理論的
予測曲線(N=2), (●); 実測値, (○); シミュレーション実験によ
る予測値)

また、騒音を分布関数の関数形として予測する必要はなく、単に数値的に予測すれば十分な場合には、先にシミュレーション実験によって得た騒音レベルのデータ系列をそのまま用いて分布形を作成すればよい。この場合のシミュレーション実験による数値的な分布予測結果を図5.2.8, 図5.2.9 の中に併せ示している。

5.2.5 結言

本節では、前節（5.1 節）で残されていた二つの問題点（§5.1.6参照）を理論的及び実験的に考察し、次に示すように解決した。即ち、

（1）無限級数展開表現で与えられていた長時間スケールでのレベル分布表現（例えば（5.1.11）式参照）を、平均流量の出現時間率を係数に持つガウス形重み付き加算表現により、大略捉えることが可能であることを示した。無限級数展開の形でなくまとまった形態をとっていることから、分布予測の実用化の観点からは意味あるものと思われる。

（2）平均流量と音の強さとの間の回帰係数を、流体力学的交通流理論を援用して予め純理論的に求まる三つの交通流状態変数（平均車両密度、平均車速および平均流量）を推定し、車種混入率を与えて計算機シミュレーション実験により算定可能であることを示した。

（1）（2）による考察に基づき、途中の段階で実測データを用いることなく、純予測の立場から騒音レベル分布を求めることが可能であることを示した。更に、ガウス形重み付き加算分布表現の項数を低減するために、平均流量の時間的変動パターンを思い切って単純化しても、実測値との可成りのよい一致が認められた点には留意すべきである。

この節の引用文献

- 1) 山口静馬, 加藤裕一; “交通量時間率に基づく周期的非定常道路騒音の分布予測,” 日本音響学会誌, 47(10), 723-728 (1991).
- 2) R. Harberman; Mathematical Model: Traffic Flow (Prentice Hall, New York, 1977)
- 中井 久訳, 交通流の数学モデル (現代数学社, 京都, 1981) .
- 3) 佐々木實, 山下充康; “道路特殊箇所の騒音の予測に関する検討 - インターチェンジ部周辺 - ,” 日本音響学会誌, 40(9), 638-643 (1984).

第6章 信号機周辺における道路騒音の簡易予測

道路交通騒音の予測問題は、その発生源である交通流に根ざして議論する必要性があることから、第5章では信号一周期当たりでの交通量を入力情報として、交通変数の変動パターンをまず推定する問題を考察した。次いで、推定された交通変数のうち、平均流量の変動パターンを用いて第4章までの考察に帰着させることにより、騒音レベル分布を予測することが原理的に可能であることを示した。

しかしながら、第5章での予測手法を信号機周辺での多くの道路騒音問題に適用するには次に記す問題点が残されている。

1) 信号一周期内での交通変数を推定するためには、流体力学的交通理論とその実用化アルゴリズムを十分に理解した上で計算機シミュレーションを行う必要がある。

2) 平均流量と音の強さとの統計量に関する回帰的關係を設定するためには、モンテ・カルロ法による計算機シミュレーション実験を行い、一旦騒音レベルデータを発生させる必要がある。

近年、パーソナルコンピュータの能力が飛躍的に増強しているが、このような計算機の援用のもとに騒音予測することを考えるにしても、かなりの計算量を要していた。一旦、原理的に騒音予測することが可能であることが分かれば、この原理的基本構造を踏まえた上で、予測方式の簡易化や適用の容易化を計る必要があるだろう。

本章ではこのような観点から、第5章で考察した信号機が数多く連なる幹線道路状況での簡易な騒音予測方式を提案する。次いで、この予測方式を多くの実道路に適用して予測精度の検討並びに適用条件に関する考察を行う。

6. 1 簡易化交通流モデルに基づく¹⁾ 騒音予測と実験的検討

6.1.1 緒言

第5章では信号機が数多く連なる幹線道路を採り上げて、1) 信号一周期当たりでの流量を入力情報として与えれば、流体力学的交通流理論²⁾を用いて、信号一周期内での交通変数（平均車両速度、平均車両密度、平均流量）の推定が可能となること、2) 大型車混入率（事前入力情報）と推定した交通変数を用いて、発生騒音の観測点（道路端）でのレベル分布予測が可能となることを示してきた。

しかしながら、例えば新設道路等で生じる騒音の予測問題に容易に適用し、騒音レベル分布や L_{eq} 、 L_{90} 等の騒音指標を簡易に予測するといった問題に対しては次に示す2つの問題点が残されている。

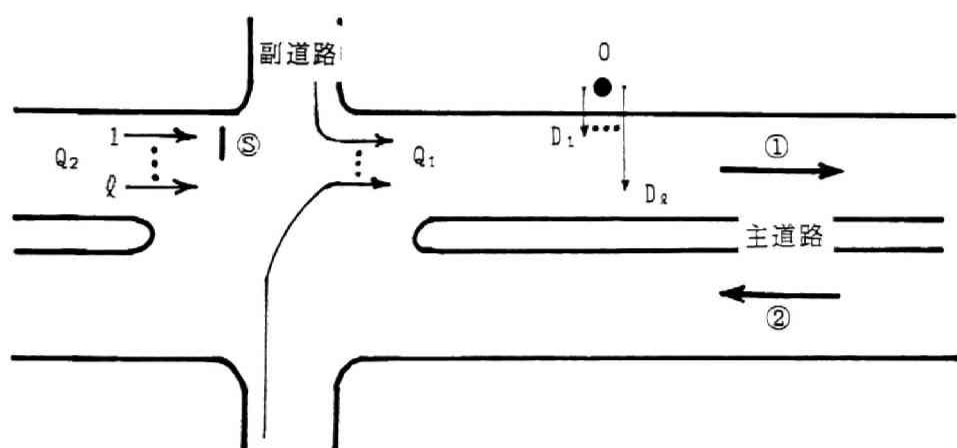
1) 5.1節で考察したように、騒音発生源である交通流状態を推定するためには、信号一周期内に騒音観測点に車両が到達すると思われる領域に対しての道路システムパラメータ（§5.1.3参照）を設定する必要があることのみならず、流体力学的交通流理論（§5.1.2）及びその実用化アルゴリズム（§5.1.3参照）を十分理解した上で、状態推定のためのシミュレーションを行う必要があった。即ち、出来る限り少ない設定条件とそれほど深い専門知識を必要とせず大略的に交通変数を推定して、結果的に騒音レベル分布や騒音指標をある精度内で予測することが出来れば、工学的有効性が更に得られることは明かである。

2) 5.2節では推定した交通変数と大型車混入率を与えて、一旦シミュレーション実験により発生させた騒音レベルデータを用いて、音の強さの統計量と流量との回帰関係を設定した。この関係が得られて、はじめて対象交通流からの発生騒音を算定することが可能となり、騒音レベル分布関数の予測が可能となった。この回帰関係が解析的表現で与えられるならば、例えば車種混入率が変動した場合に対する騒音の可能性を探るといった問題に対し、いちいちシミュレーション実験を行う労力が省かれるのみならず、この解析的表現から騒音対策の指針も得られよう。

本節ではこのような第5章での考察の問題点をふまえて、信号機周辺での簡易で適用容易な騒音予測方式を提案し、実道路に適用して有効性を検証することを目的とする。具体的には、§5.2.4において平均流量の変動パターンを主道路側の信号機が赤・青を点灯す

る2つの状態での平均値で単純化し、レベル分布を予測しても良好な結果が得られたことに着目する。即ち、流体力学的交通流理論を用いて推定した流量の変動パターンは騒音レベル分布を予測する上では、結果的には§5.2.4の考察に示したように2つの平均値による変動パターンで十分に近似化が可能であることから、本節では初めからこの流量の変動パターンを仮定した交通流モデルを導入して騒音レベル分布を表現する。このモデル化により、まず上記問題点1)を解決する。次いで、指数分布モデルの解析結果を利用して騒音の音の強さに関する統計量を伝搬環境、道路状況及び交通流を記述するパラメータにより近似的に解析表現で与えた後、この音の強さに関する統計量が流量との回帰的關係で捉えられることを示す。即ち§5.1.5では、実測レベルデータを用いて算定していた回帰係数、及び§5.2.4ではシミュレーション実験によって発生したレベルデータにより算定していた回帰係数が上記パラメータ（伝搬環境、道路状況及び交通流パラメータ）を用いて算定可能であることを示し、上記問題点2)を解決すると同時に、§5.1.5及び§5.2.4の考察の正当性を改めて示す。またこの簡易交通流モデルに基づく騒音レベル分布表現は、騒音指標 L_{eq} 、 L_{dn} の陽表示が可能であることを示す。陽表示可能であることは工学的に重要である。最後に、上記簡易交通流モデルに基づく騒音予測方式を実道路7箇所に適用して、予測精度や適用条件等に関する実験的検討を行う。

6.1.2 交通流及び騒音発生モデルの設定と理論的考察



第 6.1.1 図 信号機付近での道路騒音観測状況

図 6.1.1 に示す信号機周辺において、騒音レベル変動を 0 点で長時間観測した場合での騒音レベル分布の予測問題を考察する。以下に道路状況、交通流状況、車両の出力音響

パワーに関する設定，伝搬環境及び事前入力情報を設定する。

A. 道路状況と交通流に対する設定

(1)主道路は片側 Q 車線を有し，観測点に近い車線から第 1 車線，第 2 車線，…，第 Q 車線，…とする。

(2)観測点 0 と第 i 車線との距離を l_i [m]とする。

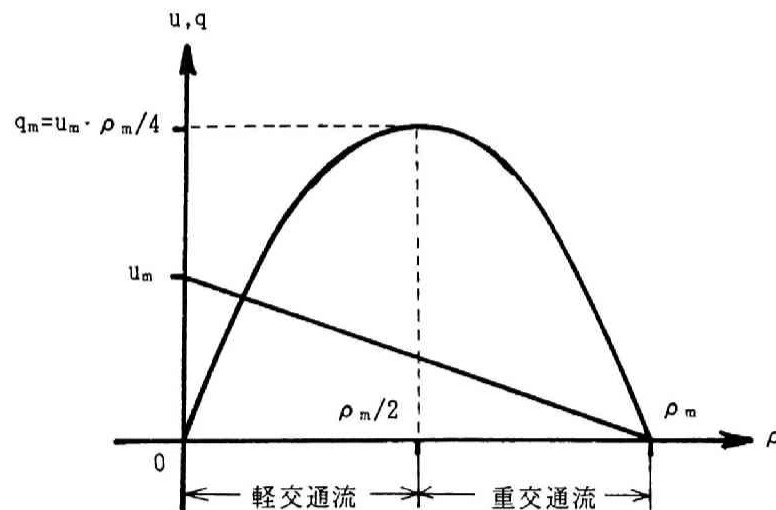
(3)信号一周期の時間 T は主道路側の信号機⑤が赤及び青を点灯しているそれぞれ T_1 ， T_2 時間から成るものとする ($T=T_1+T_2$)。通常なされるように，点灯時間の短い黄信号は無視する。

(4)各車線での車種分類は大型車・小型車の 2 車種分類とする。

(5)車線によらず交通流状態は同一とする。即ち，車線により交通量や車種混入率等に顕著な差がないものとする。

(6)交通流を交通変数（平均車両密度： $\rho=1/S$ [台/m]，平均車両速度： u [m/sec]，平均流量： $q=\rho \cdot u$ [台/sec]）で代表して記述するものとし，§ 5.1.2 と同様に基本的関係式として次のグリーンシールズモデル³⁾を仮定する（図 6.1.2 参照）。

グリーンシールズモデル： $u=u_m(1-\rho/\rho_m)$ （従って $q=\rho \cdot u_m(1-\rho/\rho_m)$ ）



第 6.1.2 図 グリーンシールズモデルの $u(\rho)$ と $q(\rho)$

B. 車両の出力音響パワーレベルの設定

§ 4.2.3-2, § 5.2.3 での考察と同様に, 以下のように出力パワーに関するモデルを導入する。車両の出力音響パワーレベルはガウス分布（音響パワーは対数正規分布）に従い, その平均値と標準偏差を次のように設定する⁴⁾。

1) 速度 V [km/h] で走行する大型車 ($\lambda=1$) のパワーレベルは

$$\text{平均: } \mu(\lambda=1, V)=97+0.2V \quad [\text{dB(A)}]$$

$$\text{標準偏差: } \sigma(\lambda=1)=3.3 \quad [\text{dB(A)}]$$

2) 速度 V [km/h] で走行する小型車 ($\lambda=2$) のパワーレベルは

$$\text{平均: } \mu(\lambda=2, V)=87+0.2V \quad [\text{dB(A)}]$$

$$\text{標準偏差: } \sigma(\lambda=2)=3.6 \quad [\text{dB(A)}]$$

C. 騒音の伝搬環境の設定

(1) 0 点で観測される騒音は観測点側の車線（図 6.1.1 における①方向）から発生する騒音が支配的であり, 反対側車線（図 6.1.1 における②方向）からの寄与は十分小さいとする。即ち, 車線幅が広く, 車線数が多い場合や中央分離帯の樹木により, かなり減衰し, 反対側車線からの騒音は暗騒音に寄与していると仮定している。

(2) ①方向の交通量がかなり有り, 暗騒音は十分無視出来るものとする。即ち, 暗騒音は①方向の交通量が極めて小さくなる状況でレベル分布形状に影響を与えられられる。

(3) ①方向の車線を走行する車両から観測点 0 への騒音の伝搬環境は, しばしば用いられる半自由空間モデルを仮定する。

D. 事前入力情報

一旦このような道路状況等に関する設定を行えば, 第 5 章での考察から明かになったように信号一周周期当たりの交通量と大型車混入率を入力情報として与えれば, 観測点 0 での騒音レベル分布を予測することが可能となる。本節では, 次のように入力情報を設定する。

(1) 副道路から①方向への進入交通量は信号一周周期当たり q_1 [台]であり, その大型車混入率は θ_1 である。

(2) 主道路の①方向への交通量は信号一周周期当たり q_2 [台]であり, その大型車混入率は θ_2 である。

さて, 観測点 0 での, 信号一周周期の流量の変動パターンは § 5.1.4 での考察から大略図 6.1.3(a) に示す変動パターンとなろう。この変動パターンを図 6.1.3(b) に示すように,

信号機が赤を点灯するときの平均流量 $q_1 = Q_1 / T_1 / \ell$ [台/sec/車線]，及び青を点灯するときの平均流量 $q_2 = Q_2 / T_2 / \ell$ [台/sec/車線]で近似する。§ 5.2.4 での考察で示したように，このように流量の変動パターンを近似化して騒音レベル分布を予測しても，十分に良好な結果が得られることを既に示している。このとき，長時間での騒音のレベル確率密度関数表現の枠組みは，5.2節での考察から次の重み付きガウス分布で与えられる。

$$p(L) = B_1 g(L; \mu_L(q_1), \sigma_L^2(q_1)) + B_2 g(L; \mu_L(q_2), \sigma_L^2(q_2)) \quad (6.1.1)$$

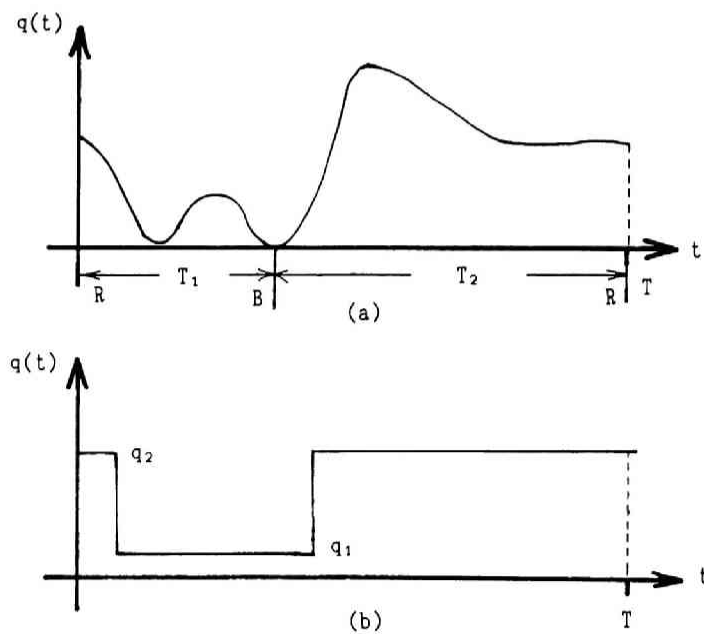
$$\text{ここに } B_1 = T_1 / T, \quad B_2 = T_2 / T \quad (B_1 + B_2 = 1),$$

$$g(L; \mu_L(q_j), \sigma_L^2(q_j)) = 1 / (2\pi \sigma_L^2(q_j))^{1/2} \cdot \exp\{-(L - \mu_L(q_j))^2 / 2\sigma_L^2(q_j)\},$$

$$\mu_L(q_j) = M \ln[\mu_I^2(q_j) / (\sigma_I^2(q_j) + \mu_I^2(q_j))^{1/2}] \quad (6.1.2)$$

$$\sigma_L^2(q_j) = M^2 \ln[(\sigma_I^2(q_j) + \mu_I^2(q_j)) / \mu_I^2(q_j)]$$

$M=10/\ln 10$ である。また， $\mu_I(q_j) (=K_{1j}(q_j))$ は観測点での音の強さの平均（一次キュムラント）であり， $\sigma_I^2(q_j) (=K_{2j}(q_j))$ は分散（二次キュムラント）（ $j=1, 2$ ）である。 $\mu_I(q_j)$ ， $\sigma_I^2(q_j)$ が流量 q_j の関数となることは以下の考察で明かにする。



第 6.1.3 図 信号一周期内的での流量の変動パターン (a) とその近似化パターン(b)

従って、観測点での $\mu_i(q_i)$ 及び $\sigma_i^2(q_i)$ ($i=1, 2$) が上記設定条件 A, B, C 及び入力情報を用いて算定できれば、目的の (6.1.1) 式を具体化することが可能となる。この考察を § 6.1.2-1 で行う。更に、§ 6.1.2-2 では音の強さに関する統計量（平均，分散等）が平均流量 q_i によって捉えられることを考察する。

6.1.2-1 音の強さの統計量に対する考察

§ 4.1.2 での考察と同様に、既によく知られている定常的な交通流状態での解析結果を利用して、騒音の音の強さに関する統計量とその発生源である交通流との関係を考察する。ここでは、参考文献 5) に示す指数分布モデルを採用する。以下にその解析結果のみ記す。

$$K_{n,i} = \sum_{j=1}^{N_q} \sum_{\lambda=1}^{\Lambda_i} (D_i \pi / S_i) \cdot (2n-3)!! / (2n-2)!! \cdot {}_{\lambda}\theta_i \cdot \langle (a_i \cdot {}_{\lambda}W_i / (4\pi D_i^2))^n \rangle \quad (6.1.3)$$

ここに、 $K_{n,i}$: 音の強さの第 n 次キュムラント， N_q : 車線数， Λ_i : 第 i 車線での車種数， D_i : 第 i 車線と観測点との距離， S_i : 第 i 車線での平均車頭間隔， ${}_{\lambda}\theta_i$: 第 i 車線での λ 車種混入率， a_i : 第 i 車線から観測点までの伝搬特性を示す係数， ${}_{\lambda}W_i$: 第 i 車線， λ 車種の音響出力パワー，である。

設定条件 A-(4), A-(5), C-(1) 及び C-(3) から $N_q=Q$, $S_i=S$, $\Lambda_i=2$, ${}_{\lambda}\theta_i={}_{\lambda}\theta$, ${}_{\lambda}W_i={}_{\lambda}W$ 及び $a_i=2$ ($i=1, \dots, N_q=Q$) と置くことにより (6.1.3) 式は次式となる。

$$K_{n,i} = C_n \cdot K_{n,i}' \quad (6.1.4)$$

ここに

$$C_n = (2n-3)!! / (2n-2)!! \cdot \pi D_1 \cdot (1 / (2\pi D_1^2))^n \cdot \left(1 + \sum_{j=2}^Q (D_1 / D_j)^{2n-1} \right) \quad (6.1.5)$$

$$K_{n,i}' = \left(\sum_{\lambda=1}^2 {}_{\lambda}\theta \cdot \langle {}_{\lambda}W^n \rangle \right) / S \quad (6.1.6)$$

と置いている。(6.1.4), (6.1.5), (6.1.6) 式から、設定条件 A, B, C より直接定まる定数 C_n と入力情報により推定される $K_{n,i}'$ の積により $K_{n,i}$ は算定されることが分かる。従って、

$k_{n,i}'$ ($n=1, 2, \dots$) の推定問題, 特に二次の統計量までで十分であることから $k_{1,i}'$ 及び $k_{2,i}'$ を推定することを以下に考察する。

6.1.2-2 音の強さの統計量と流量との回帰的關係に対する考察

$k_{n,i}'$ ($n=1, 2$) を事前入力情報 D-(1), D-(2) より推定した後, 流量と回帰的關係により捉えられることが可能であること示して, § 4.1.2 及び § 5.1.5 での考察の正当性をあらためて確認する。

はじめに, 入力情報 $Q=Q_j$ ($j=1, 2$) [台] を与えれば各車線での平均流量は $q=q_j=Q_j/T_j/Q$ [台/sec/車線] となることから, 設定 A-(6) よりこのときの平均車両密度及び平均車両速度はグリーンシールズモデルを用いて,

$$\rho_{\pm} = \rho_m (1 \pm (1 - 4q/(u_m \rho_m))^{1/2}) / 2 \quad (6.1.7)$$

(+: 重交通流, -: 軽交通流 (図 6.1.2 参照))

$$u_{\pm} = u_m (1 - \rho_{\pm} / \rho_m) \quad (6.1.8)$$

と算定され交通流状態の推定が可能となる。従って, この交通流状態から発生する各車両の出力パワーの一次統計量 $\langle \lambda \# \rangle$ 及び二次統計量 $\langle \lambda \#^2 \rangle$ ($\lambda=1$ (大型車), $\lambda=2$ (小型車)) は設定 B. を用いて,

$$\langle \lambda \# \rangle = \exp \{ \mu(\lambda, V=3.6 u_{\pm}) / \# + (\sigma(\lambda) / \#)^2 / 2 \}$$

$$\langle \lambda \#^2 \rangle = \exp \{ 2\mu(\lambda, V=3.6 u_{\pm}) / \# + 2(\sigma(\lambda) / \#)^2 \}$$

となることより, (6.1.6) 式の $k_{n,i}'$ ($n=1, 2$) は具体的に

$$\begin{aligned} k_{1,i}' &= \rho_{\pm} \cdot (i_1 \theta \cdot \langle 1 \# \rangle + (1 - i_1 \theta) \cdot \langle 2 \# \rangle) \\ &= \rho_{\pm} \cdot (i_1 \theta \cdot \exp \{ \mu(1, V=3.6 u_{\pm}) / \# + (\sigma(1) / \#)^2 / 2 \} \end{aligned}$$

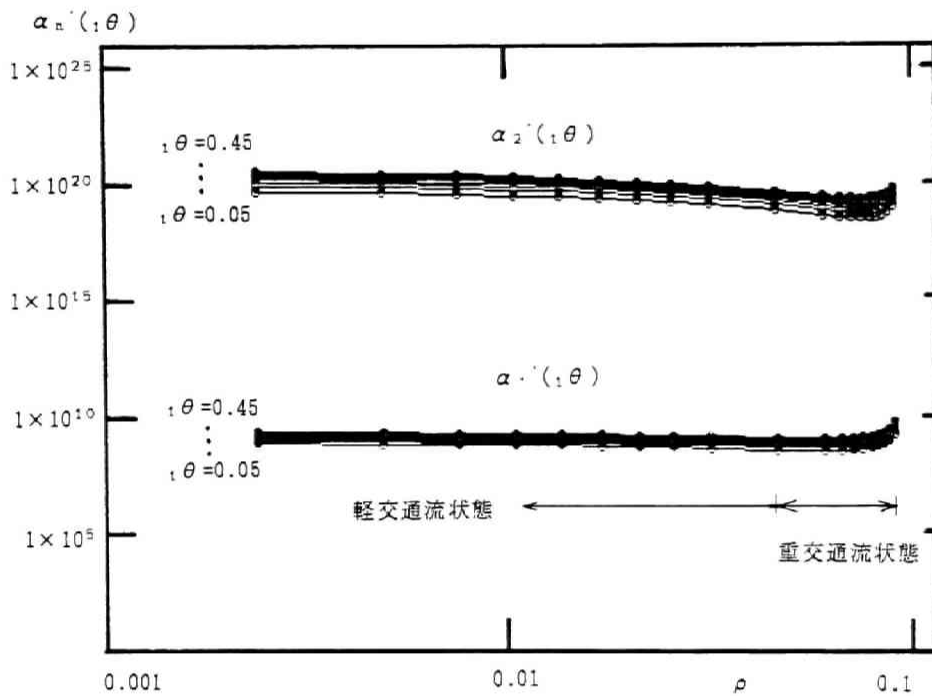
$$+(1-\theta) \cdot \exp\{\mu(2, V=3.6 u_{\pm})/H+(\sigma(2)/H)^2/2\} \quad (6.1.9)$$

$$K_{2r}' = \rho_{\pm} \cdot (\theta \cdot \langle_1 H^2 \rangle + (1-\theta) \cdot \langle_2 H^2 \rangle)$$

$$= \rho_{\pm} \cdot (\theta \cdot \exp\{2\mu(1, V=3.6 u_{\pm})/H+2(\sigma(1)/H)^2\}$$

$$+(1-\theta) \cdot \exp\{2\mu(2, V=3.6 u_{\pm})/H+2(\sigma(2)/H)^2\}) \quad (6.1.10)$$

と算定される。



第 6.1.4 図 回帰係数 $\alpha_1'(\theta)$, $\alpha_2'(\theta)$ の平均車両密度 ρ に対する変動

次に、 K_{nr}' ($n=1, 2$) が大型車混入率 θ をパラメータとして、流量により回帰的に捉えられること ($K_{nr}' = \alpha_n'(\theta) \cdot q$) を数値的に検討する。図 6.1.4 は (6.1.9) 及び (6.1.10) 式を用いて、 $\alpha_n'(\theta)$ ($n=1, 2$) を $\theta=0.05, 0.10, \dots, 0.45$ として描いたものである。平均流量 q に対応する平均車両密度は ρ_{\pm} と二つ定まる (6.1.7) 式参照) ことから図 6.1.4 はこの ρ に対して示している。強い重交通流領域で多少上昇加減であるが、回帰係数 $\alpha_n'(\theta)$ はほぼ一定値であると見なせる。実交通流ではほとんどの場合、軽交通流状態あるいは最大流量付近での車両密度 (図 6.1.2 参照) で走行しており、このような強い重交通

流領域での $\alpha_{n'}(1, \theta)$ の変動は問題となるまい。従って(6.1.4) 式は,

$$K_{n'} = C_n \cdot \alpha_{n'}(1, \theta) \cdot q \quad (n=1, 2) \quad (6.1.11)$$

$$(K_{1'} = \mu_{1'}(q), K_{2'} = \sigma_{1'}^2(q))$$

と回帰表現が可能なり § 5.1.5 , § 5.2.2 での考察, 及び (6.1.2) 式の表現の正当性があらためて確認される。

特に, 主道路側の信号機が赤 ($j=1$) 及び青 ($j=2$) を点灯している状態での ρ_{\pm} , u_{\pm} , $\alpha_{n'}(1, \theta)$, $K_{n'}(n=1, 2)$ を次のように表記する。

$$\rho_{\pm}(j) = \rho_{\pm} \Big|_{q=q_j}, \quad u_{\pm}(j) = u_{\pm} \Big|_{q=q_j}, \quad \alpha_{n'}(j) = \alpha_{n'}(1, \theta = \Theta_j)$$

$$K_{1'}(j) = K_{1'} \Big|_{q=q_j, 1, \theta = \Theta_j} \quad (6.1.12)$$

$$K_{2'}(j) = K_{2'} \Big|_{q=q_j, 1, \theta = \Theta_j} \quad (6.1.13)$$

$$(j=1, 2)$$

6.1.3 騒音指標 L_{50} , L_{50q} の陽表示

道路騒音の予測方式として, レベル分布予測が容易であるだけでなく, 代表的な騒音指標がそのレベル分布関数表現より陽表示できることは, その予測方式にとって工学的に重要である。ここでは, 道路騒音の環境基準, 要請基準として用いられている L_{50} , 並びに人間の心理との対応性が良いことから近年その重要性が指摘されている L_{50q} , の各指標が (6.1.1) 式で与えた騒音レベルの確率密度関数表現から陽表示できることを示す。

A. L_{50} の陽表示⁶⁾

(6.1.1) 式で与えられるレベル分布関数 $P(L) (\triangleq \int_{-\infty}^L p(L) dL)$ の L_{50} (中央値) は次の

方程式を満足する。

$$\begin{aligned}
 0.5 &= \beta_1 \cdot \int_{-\infty}^{L_{50}} g(L; \mu_L(q_1), \sigma_L(q_1)) dL + \beta_2 \cdot \int_{-\infty}^{L_{50}} g(L; \mu_L(q_2), \sigma_L(q_2)) dL \\
 &= \beta_1 \cdot \Phi(L_{50}; \mu_L(q_1), \sigma_L(q_1)) + \beta_2 \cdot \Phi(L_{50}; \mu_L(q_2), \sigma_L(q_2)) \quad (6.1.14)
 \end{aligned}$$

ここに,

$$\Phi(L; \mu, \sigma) \triangleq \int_{-\infty}^L g(L; \mu, \sigma) dL \quad (6.1.15)$$

である。(6.1.15) 式は Williams の近似式⁷⁾を用いれば,

$$\Phi(L; \mu, \sigma) = 1/2 + 1/2 \cdot [1 - \exp(-2\pi \cdot (L - \mu)^2 / \sigma^2)]^{1/2} \quad (L \geq \mu)$$

$$= 1/2 - 1/2 \cdot [1 - \exp(-2\pi \cdot (L - \mu)^2 / \sigma^2)]^{1/2} \quad (L < \mu)$$

となること, $\mu_L(q_1) < L_{50}$ かつ $\mu_L(q_2) > L_{50}$ であることを用いれば, (6.1.14) 式は次式となる。

$$\begin{aligned}
 0.5 &= \beta_1 \cdot \{1/2 + 1/2 \cdot [1 - \exp(-2\pi \cdot (L_{50} - \mu_L(q_1))^2 / \sigma^2_L(q_1))]^{1/2}\} \\
 &\quad + \beta_2 \cdot \{1/2 - 1/2 \cdot [1 - \exp(-2\pi \cdot (L_{50} - \mu_L(q_2))^2 / \sigma^2_L(q_2))]^{1/2}\}
 \end{aligned}$$

上式の指数関数部分をテイラー展開し, 第二項で近似して整理すれば次式を得る。

$$\beta_1 \cdot (L_{50} - \mu_L(q_1)) / \sigma_L(q_1) = \beta_2 \cdot (\mu_L(q_2) - L_{50}) / \sigma_L(q_2)$$

従って, (6.1.1) 式により表現される騒音レベル分布関数の L_{50} 値 (中央値) は近似的に次式と陽表記される。

$$\begin{aligned}
L_{eq} &= \sigma_L(q_1) \cdot \sigma_L(q_2) / (\sigma_L(q_2) + B_{21} \cdot \sigma_L(q_1)) \\
&\times (B_{21} \cdot \mu_L(q_2) / \sigma_L(q_2) + \mu_L(q_1) / \sigma_L(q_1)) \\
&\quad (B_{21} \triangleq B_2 / B_1)
\end{aligned} \tag{6.1.16}$$

B. L_{eq} の陽表示

(6.1.1) 式の確率密度関数に対するモーメント母関数 $M_L(\theta)$ は次式となる。

$$\begin{aligned}
M_L(\theta) &= \langle \exp(L\theta) \rangle_L \\
&= B_1 \cdot \exp(\mu_L(q_1)\theta + \sigma_L^2(q_1)\theta^2/2) \\
&\quad + B_2 \cdot \exp(\mu_L(q_2)\theta + \sigma_L^2(q_2)\theta^2/2)
\end{aligned}$$

一方, $L = M \cdot \ln(I/I_0)$ ($I_0 = 10^{-12}$ (Watt/m²)) であることより, $\langle I/I_0 \rangle = \langle \exp(L/M) \rangle_L = M_L(1/M)$ となる。従って, L_{eq} の陽表示として次式を得る。

$$\begin{aligned}
L_{eq} &= M \cdot \ln(\langle I/I_0 \rangle) \\
&= M \cdot \ln(M_L(1/M)) \\
&= M \cdot \ln\{B_1 \cdot \exp(\mu_L(q_1)/M + (\sigma_L(q_1)/M)^2/2) + B_2 \cdot \exp(\mu_L(q_2)/M + (\sigma_L(q_2)/M)^2/2)\}
\end{aligned} \tag{6.1.17}$$

6.1.4 簡易予測手法の実験的検討

§ 6.1.2 では第 5 章で考察した騒音予測方式を簡易化することを目的として, 交通流状況並びに騒音の発生・伝搬に関する仮定とモデルを設定し, (6.1.1) 式による騒音レベル分布が容易に具体化できることを考察した。ここでは, 1) この理論的考察結果を予測手順としてまとめる (§ 6.1.4-1)。2) 1) の予測手順に従い, 実道路 7 カ所に適用した結果をまとめる (§ 6.1.4-2)。3) 2) の予測結果に基づき, § 6.1.2 で設定したモデルの妥当性

や適用する上での留意点等を考察する（§ 6.1.4-3）。

6.1.4-1 簡易評価法の予測手順

§ 6.1.2 で考察した騒音予測方式の手順，具体的には（6.1.1）式での $\beta_i, \mu_i(q_i), \sigma_i(q_i)$ ($i=1, 2$) を算定する手順を以下にまとめる。

Step 1 : 道路状況パラメータ (u_m, ρ_m, T_1, T_2 ($T=T_1+T_2$)), 観測状況パラメータ (D_1, D_2, \dots, D_8, Q) を与える。

$\beta_1 = T_1/T, \beta_2 = T_2/T, C_n$ ($n=1, 2$) ((6.1.5) 式参照) を計算

u_m, ρ_m の設定法として様々な方法が考えられるが，§ 6.1.4-2 の実験的考察では次のように設定した。

$$\rho_m = 1 / (0.12 \cdot x + 6.4) \quad [\text{台/m}] \quad (6.1.18)$$

x : 大型車混入率 [%] ($0 \leq x \leq 75$)⁴⁾

$$u_m = (V_m + 10) / 3.6 \quad [\text{m/sec}] \quad (6.1.19)$$

V_m : 制限時速 [km/h]

Step 2 : 予測対象交通流の入力データ (Q_j, Θ_j) ($j=1, 2$) を与える。

$q_j = Q_j / Q / T_j$ [台/sec/車線] を計算

Step 3 : 交通流状態の推定

$\rho_{\pm}(j), u_{\pm}(j)$ ($j=1, 2$) を計算 ((6.1.7), (6.1.8) 式参照)

Step 4 : $f_{n,j}(j)$ ($j, n=1, 2$) を算定

((6.1.9), (6.1.10), (6.1.12), (6.1.13) 式参照)

Step 5 : 回帰係数 $\alpha_{n,j}(j)$ ($j, n=1, 2$) を算定

ここでは $\alpha_{n,j}(j) = f_{n,j}(j) / q$ として，軽交通流領域での平均的回帰係数を $\alpha_{n,j}(j)$ とした (図 6.1.4 参照)。

Step 6 : $K_{n1}(j) = C_n \cdot \alpha_{n1}'(j) \cdot q_j$ ($j, n=1, 2$) を算定

Step 5 を省略し ($\alpha_{n1}'(j)$ を求めず) 直接的に $K_{n1}(j) = C_n \cdot K_{n1}'(j)$ と算定することも可能である。しかしながら、 $K_{n1}(j)$ は入力情報の一つである Q_j (あるいは q_j) によって定まる変数である。即ち、 $K_{11}(j)$ と $K_{21}(j)$ は独立に変わり得る変数ではないことを明確にするために、この表現は重要であると思われる。

Step 7 : $\mu_L(q_j), \sigma_L(q_j)$ ($j=1, 2$) を算定

((6.1.2) 式参照)

Step 8 : L_{50}, L_{90} を算定

((6.1.16), (6.1.17) 式参照)

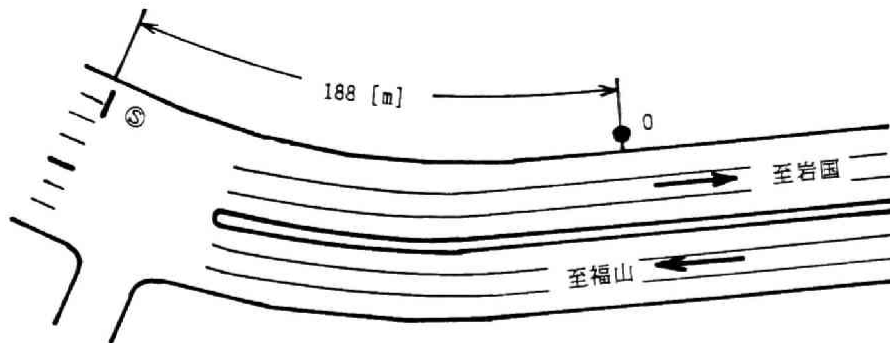
6.1.4-2 実道路への適用例

§ 6.1.2 で考察した簡易予測手法を § 6.1.4-1 でまとめた手順に従い、実道路 7 カ所に適用して実験的に検討した。以下に、道路状況並びに予測結果 (1), (2), ..., (7) を示す。

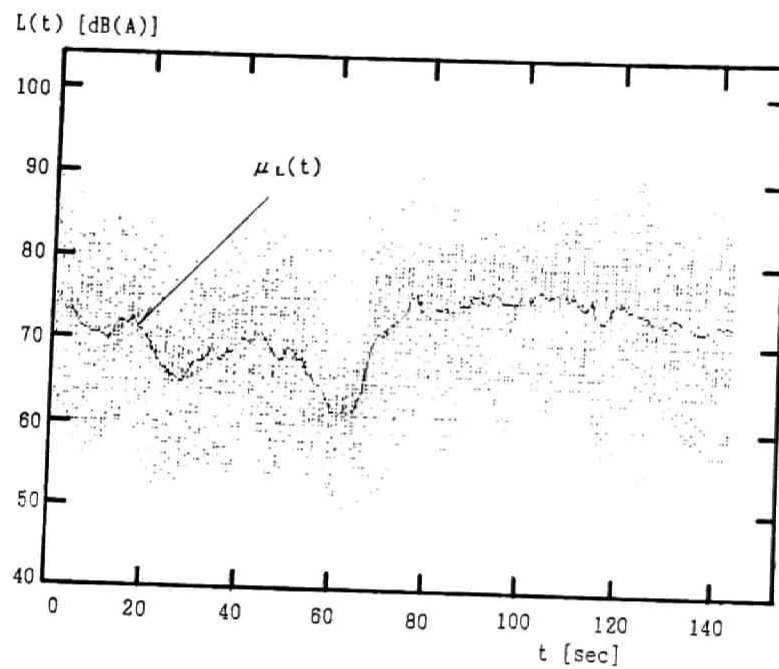
(1) 仁保 (広島市仁保町付近)

国道 2 号線沿い仁保町付近 (図 6.1.5 に示す道路状況) で道路騒音を 21 周期観測した結果を図 6.1.6 の散布図に示す。表 6.1.1 は (a) 道路状況パラメータ, (b) 観測状況パラメータ (参考に対向車線側の D_i ($i=Q+1, \dots$) も併せ示している), 及び (c) 入力状況パラメータ, をまとめたものである。ただし, 表 6.1.1(a) の ρ_m は主道路側の信号機が青であるときの車種混入率 θ_2 を用いて (6.1.18) 式より算定したもので代表している (θ_1 を用いても大差は生じない)。また, (Q_j, θ_j) ($j=1, 2$) は観測周期 $N_o=21$ 回の平均である。以上の記述内容は全て以下の適用例に対しても同様である

表 6.1.2 及び 図 6.1.7 に予測結果を示す。ちなみに, 同表及び同図(b)には $u_m = (V_m + 10 \pm 5)/3.6$ [m/sec] (これを u_m^{-5}, u_m^{+5} と記した) として予測した結果も併せ示しているが, 1) $u_m = (V_m + 10)/3.6$ として予測した結果と大差がないこと, 2) 5.1 節での実測結果は (6.1.19) 式の設定をほぼ満たしている (§ 5.1.4 参照) ことから以下の検討では (6.1.19) 式を用いる。



第 6.1.5 図 国道 2 号線沿い仁保町付近の道路状況



第 6.1.6 図 騒音レベル変動の散布図

第 6.1.1 表 実道路での測定値

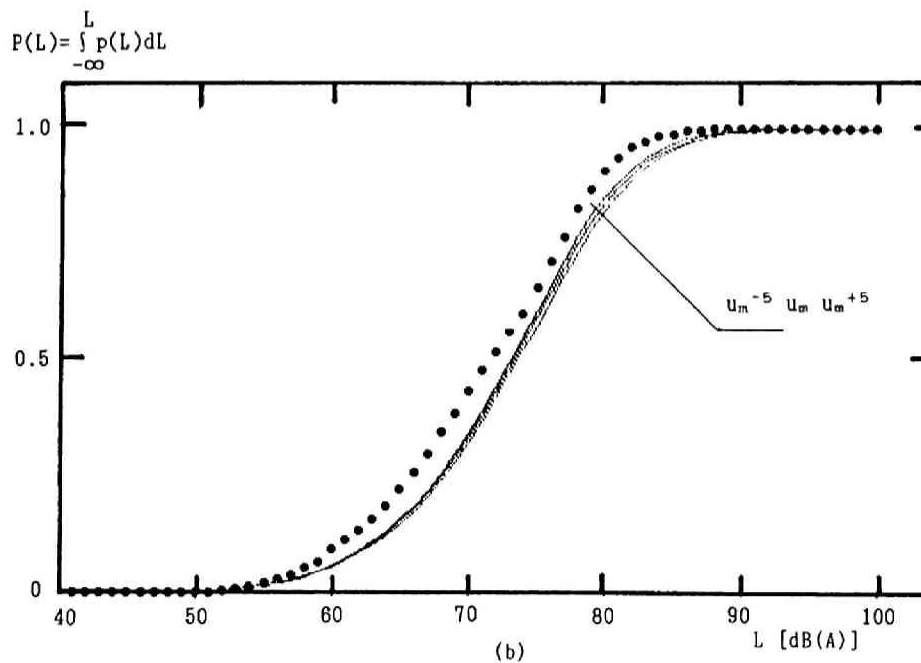
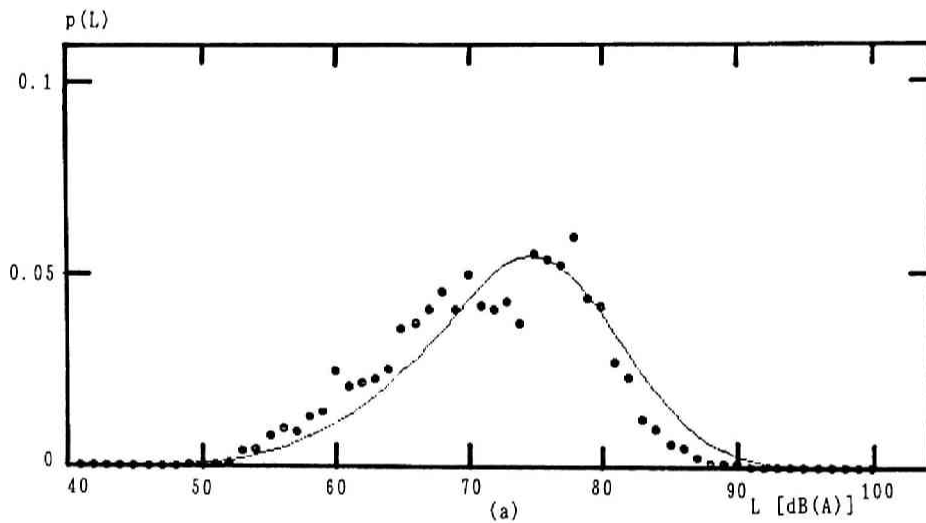
(a):道路状況パラメータ				
V_m [km/h]	u_m [m/sec]	ρ_m [台/m]	T_1 [sec]	T_2 [sec]
50	16.7	0.115	52	92

(b):観測状況パラメータ						
$2 \cdot Q$ [車線]	D_1 [m]	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
6	3.1	6.3	9.4	15.4	18.6	21.7

(c):入力情報パラメータ				
Q_1 [台/周期]	Θ_1	Q_2 [台/周期]	Θ_2	N_{cb} [周期]
13.9	0.090	65.8	0.19	21

第 6.1.2 表 騒音レベル分布関数の各パラメータの予測値と
騒音指標に対する予測値と実測値との比較

	$\mu_L(q_1)$	$\sigma_L(q_1)$	$\mu_L(q_2)$	$\sigma_L(q_2)$	L_{50}	$L_{eq}[dB(A)]$
実測値					71.5	76.3
予測値 (u_m)	67.6	7.3	75.8	5.8	73.2	78.3
(u_m^{-5})	67.3	7.1	75.5	5.7	72.9	77.9
(u_m^{+5})	67.9	7.4	76.1	6.0	73.5	78.8



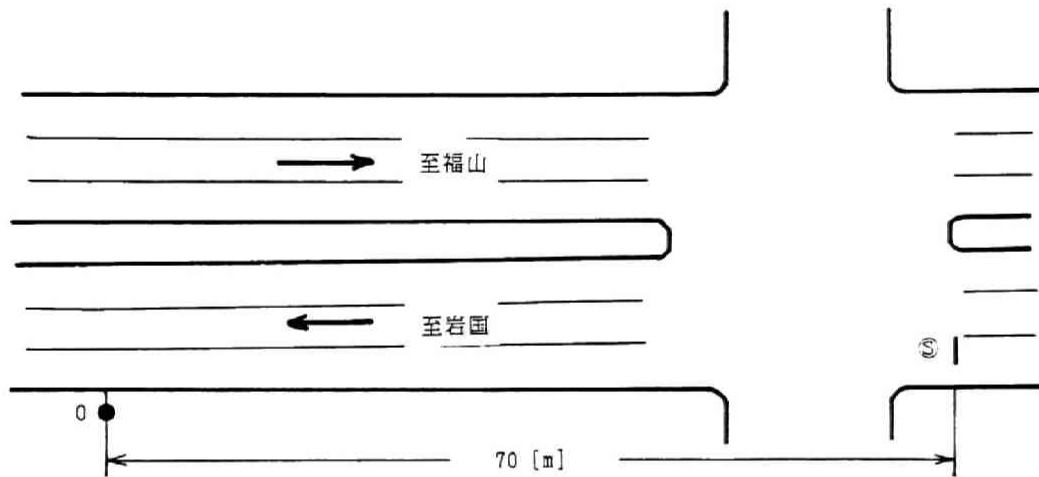
第 6.1.7 図 騒音レベル分布の予測結果と実測値との比較

(a); 度数による比較, (b); 累積分布による比較

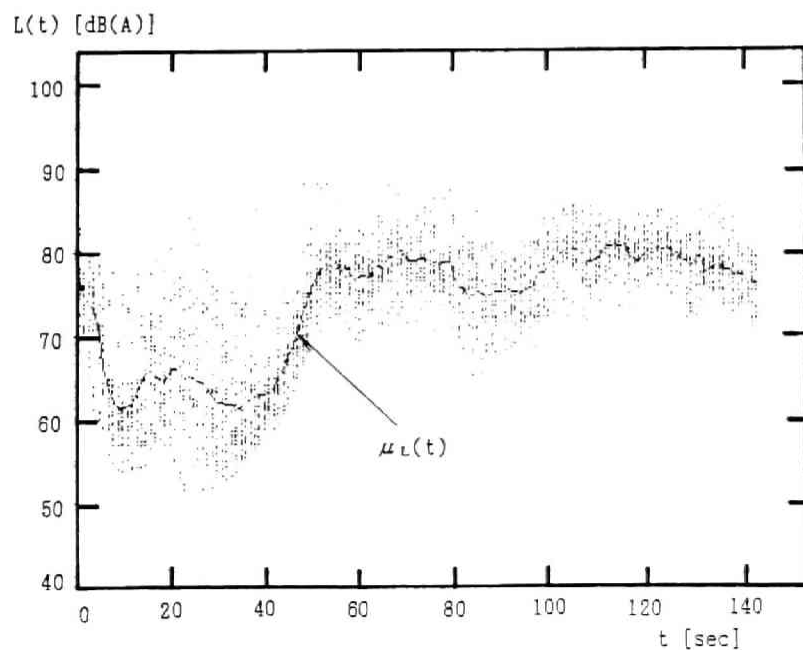
(——— ; 理論的予測曲線, (●); 実測値)

(2) 東霞（広島市東霞町付近）

国道2号線沿い東霞町付近（図 6.1.8 に示す道路状況）で道路騒音を観測した結果を図 6.1.9 の散布図に示す。表 6.1.3 は道路状況パラメータ(a)、観測状況パラメータ(b)及び入力状況パラメータ(c)をまとめたものである。表 6.1.4 及び 図 6.1.10 は予測結果をまとめたものである



第 6.1.8 図 国道2号線沿い東霞町付近の道路状況



第 6.1.9 図 騒音レベル変動の散布図

第 6.1.3 表 実道路での測定値

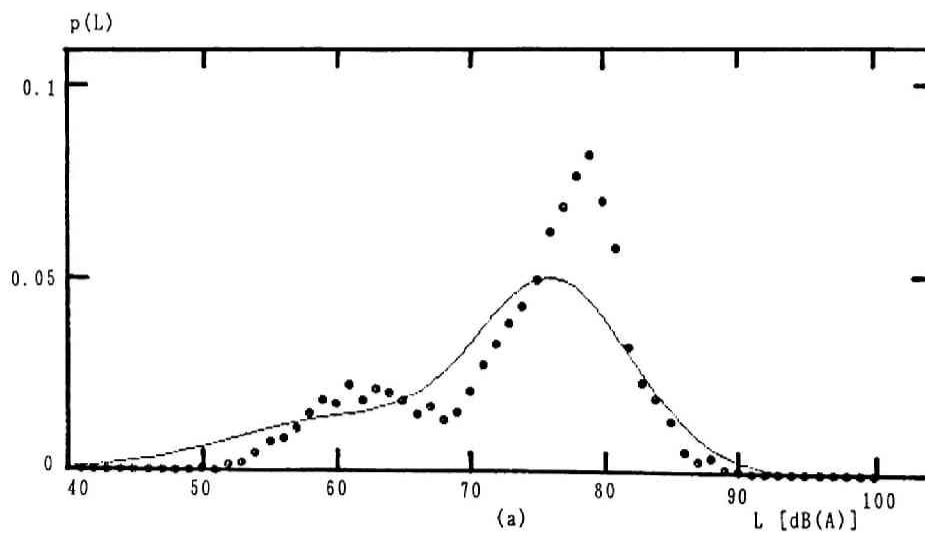
(a):道路状況パラメータ					
V_m [km/h]	u_m [m/sec]	ρ_m [台/m]	T_1 [sec]	T_2 [sec]	
50	16.7	0.117	42	102	

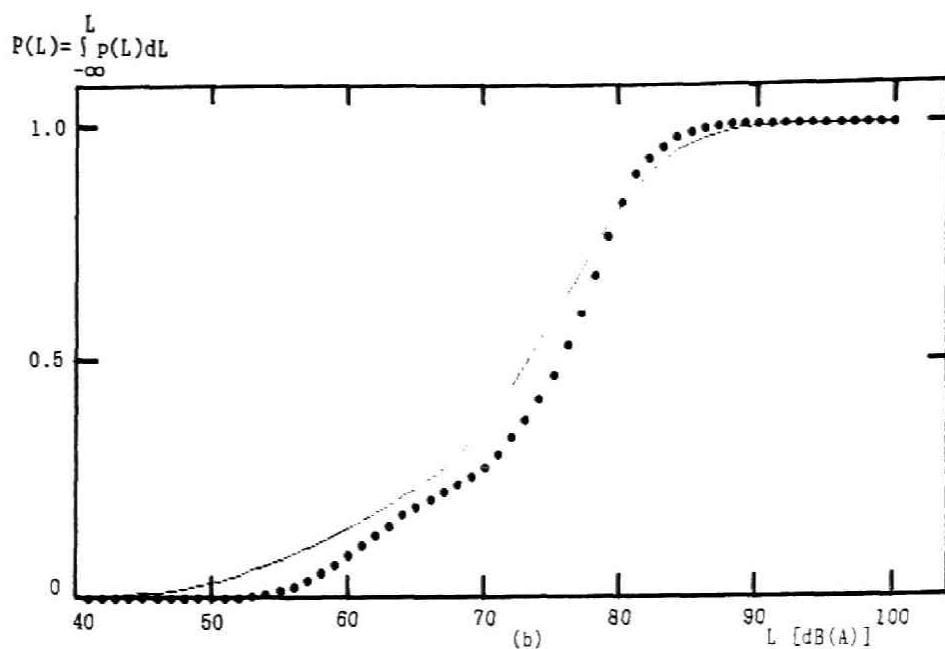
(b):観測状況パラメータ						
$2 \cdot Q$ [車線]	D_1 [m]	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
6	3.1	6.2	9.3	15.3	18.2	21.5

(c):入力情報パラメータ					
Q_1 [台/周期]	Θ_1	Q_2 [台/周期]	Θ_2	N_{ob} [周期]	
3.8	0.063	77.3	0.18	21	

第 6.1.4 表 騒音レベル分布関数の各パラメータの予測値と
騒音指標に対する予測値と実測値との比較

	$\mu_L(q_1)$	$\sigma_L(q_1)$	$\mu_L(q_2)$	$\sigma_L(q_2)$	L_{50}	L_{eq} [dB(A)]
実測値					75.5	78.0
予測値	60.1	8.5	75.9	5.8	72.4	78.4





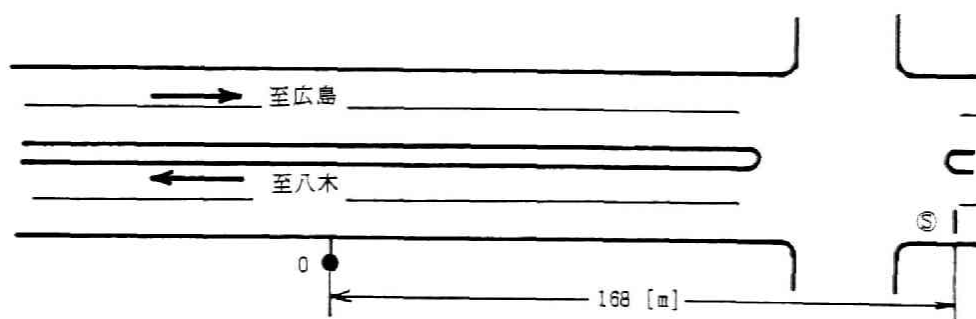
第 6.1.10 図 騒音レベル分布の予測結果と実測値との比較

(a):度数による比較, (b):累積分布による比較

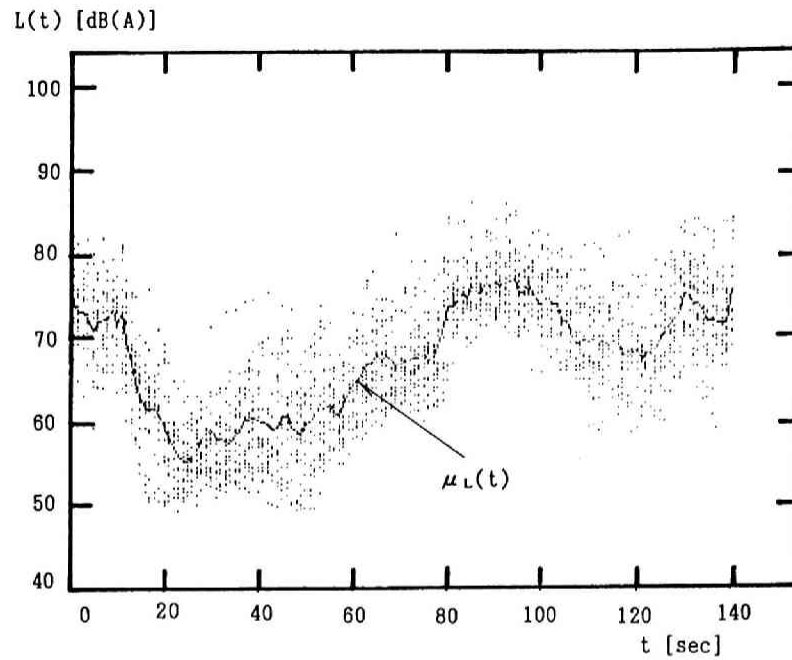
(——— : 理論的予測曲線, (●):実測値)

(3) 千足（広島市千足町付近）

県道八木・広島線沿い千足町付近（図 6.1.11 に示す道路状況）で道路騒音を観測した結果を図 6.1.12 の散布図に示す。表 6.1.5 は道路状況パラメータ(a), 観測状況パラメータ(b)及び入力状況パラメータ(c)をまとめたものである。表 6.1.6 及び 図 6.1.13 は予測結果をまとめたものである。



第 6.1.11 図 県道八木・広島線千足町付近の道路状況



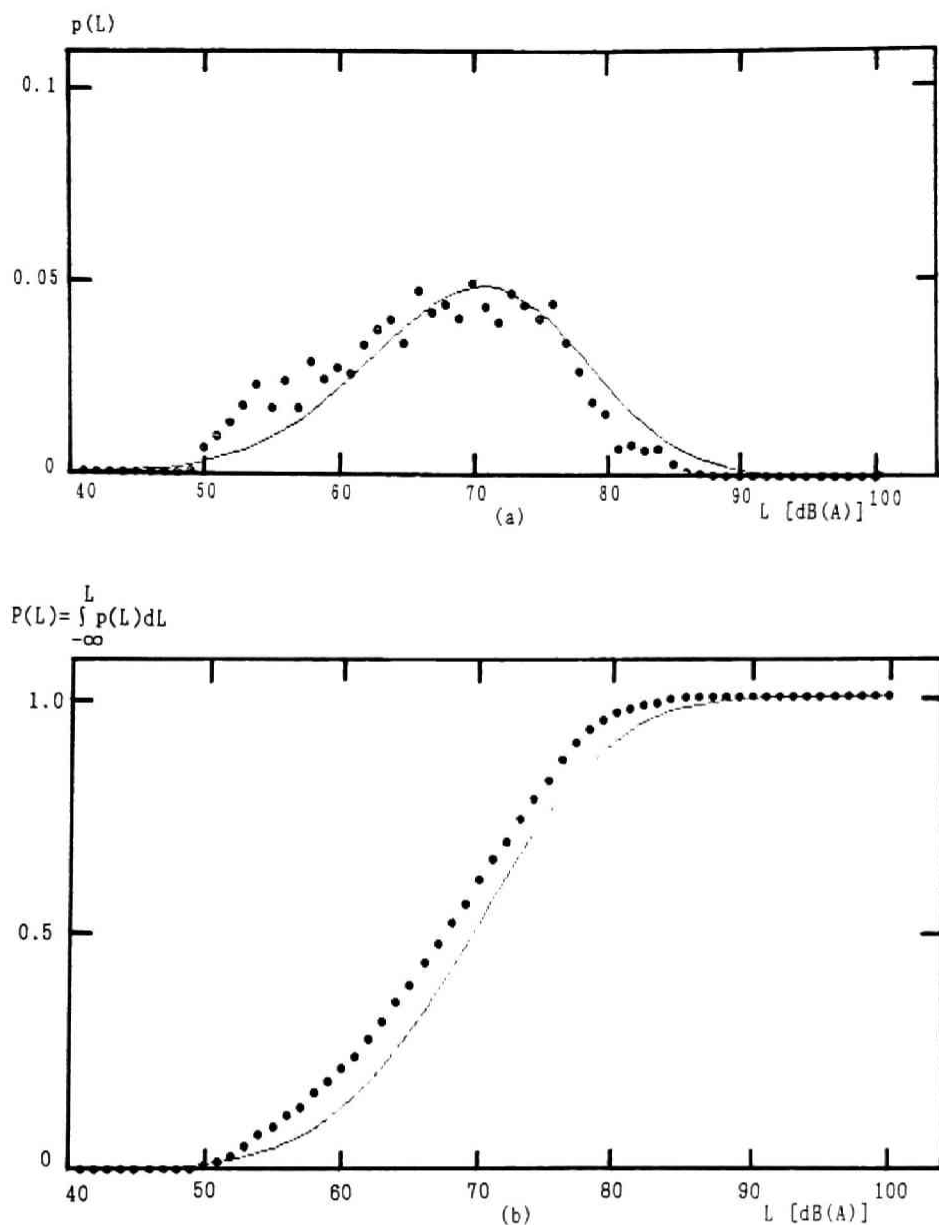
第 6.1.12 図 騒音レベル変動の散布図

第 6.1.5 表 実道路での測定値

(a):道路状況パラメータ					
V_m [km/h]	u_m [m/sec]	ρ_m [台/m]	T_1 [sec]	T_2 [sec]	
50	16.7	0.122	64	76	
(b):観測状況パラメータ					
$2 \cdot Q$ [車線]	D_1 [m]	D_2	D_3	D_4	
4	2.7	6.1	10.7	14.1	
(c):入力情報パラメータ					
Q_1 [台/周期]	Θ_1	Q_2 [台/周期]	Θ_2	N_{ob} [周期]	
9.9	0.119	31.4	0.15	17	

第 6.1.6 表 騒音レベル分布関数の各パラメータの予測値と
騒音指標に対する予測値と実測値との比較

	$\mu_L(q_1)$	$\sigma_L(q_1)$	$\mu_L(q_2)$	$\sigma_L(q_2)$	L_{50}	L_{eq} [dB(A)]
実測値	-	-	-	-	67.6	73.2
予測値	65.7	8.1	72.5	6.9	69.7	76.3



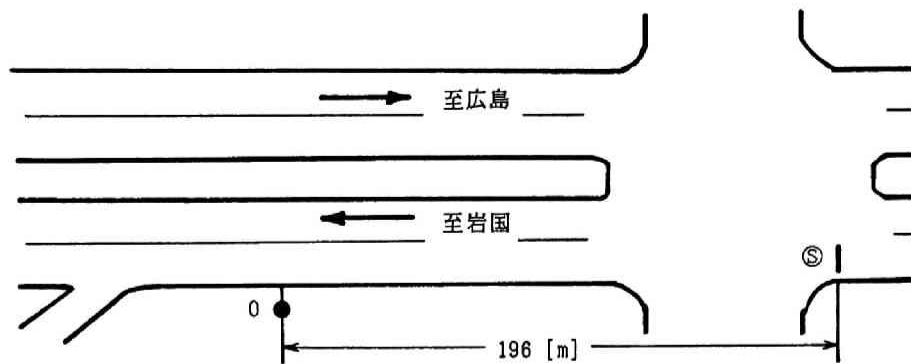
第 6.1.13 図 騒音レベル分布の予測結果と実測値との比較

(a); 度数による比較, (b); 累積分布による比較

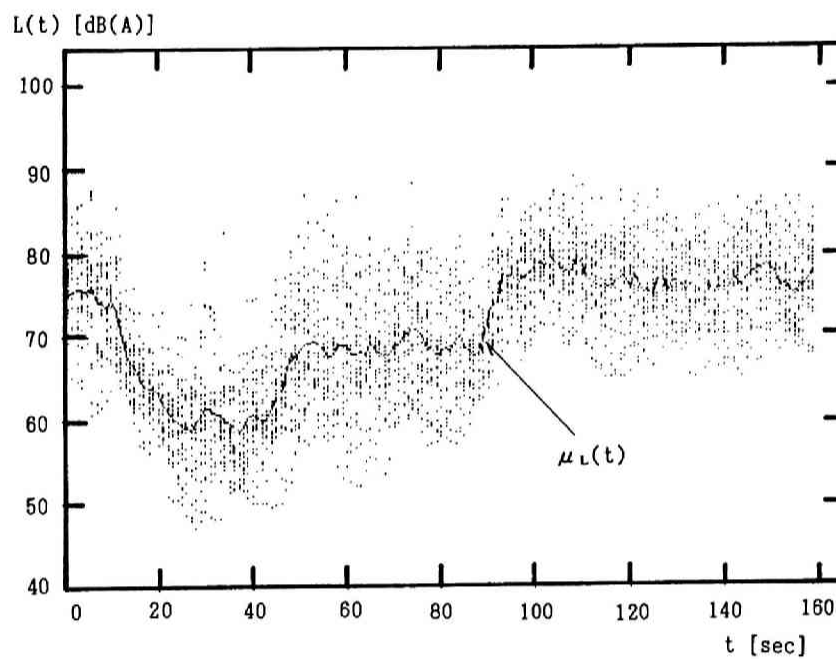
(— ; 理論的予測曲線, (●); 実測値)

(4) 宮内 (廿日市市宮内町付近)

西広島バイパス沿い宮内町付近 (図 6.1.14 に示す道路状況) で道路騒音を観測した結果を図 6.1.15 の散布図に示す。表 6.1.7 は道路状況パラメータ(a), 観測状況パラメータ(b)及び入力状況パラメータ(c)をまとめたものである。表 6.1.8 及び 図 6.1.16 は予測結果をまとめたものである。



第 6.1.14 図 西広島バイパス沿い宮内町付近の道路状況



第 6.1.15 図 騒音レベル変動の散布図

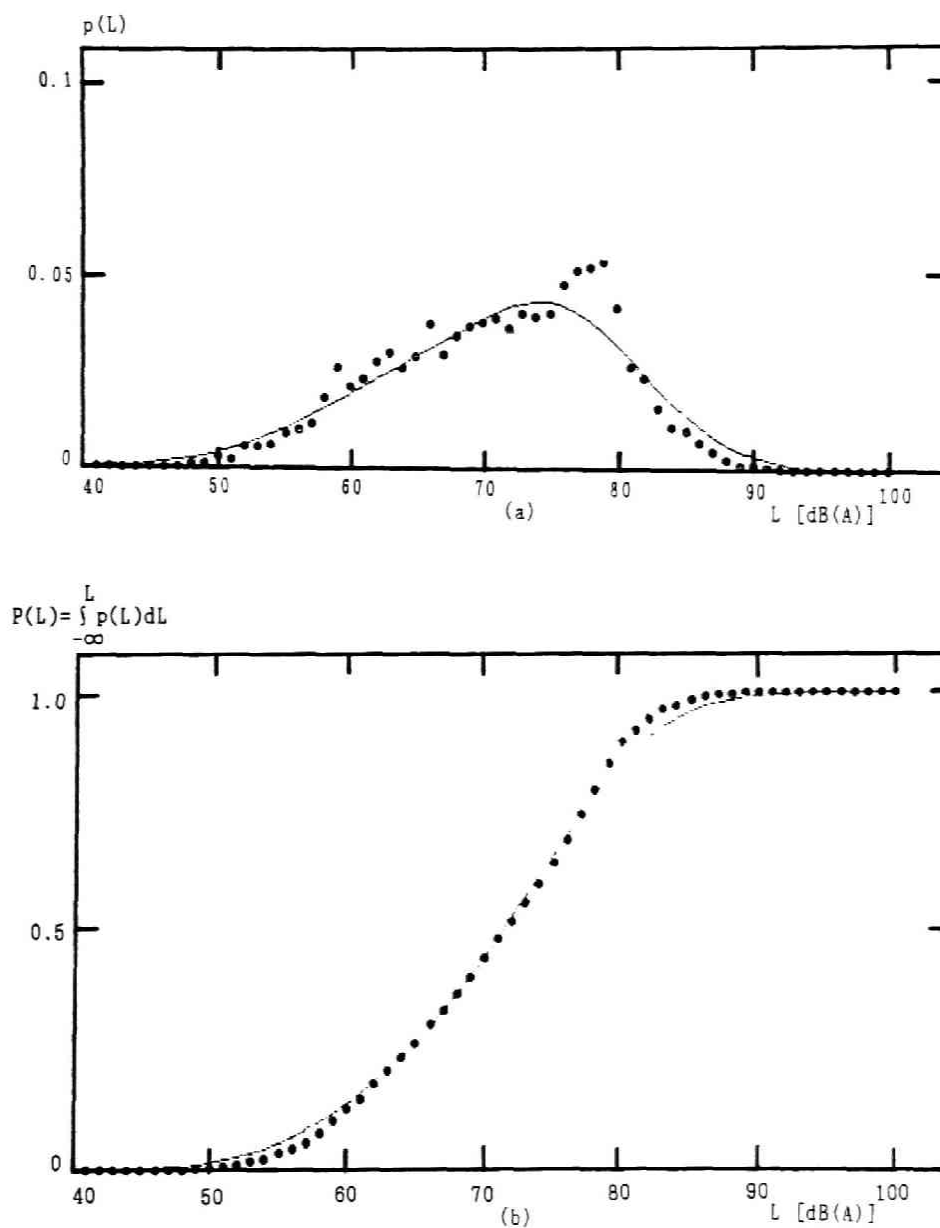
第 6.1.7 表 実道路での測定値

(a):道路状況パラメータ					
V_m [km/h]	u_m [m/sec]	ρ_m [台/m]	T_1 [sec]	T_2 [sec]	
60	19.4	0.113	76	83	
(b):観測状況パラメータ					
$2 \cdot Q$ [車線]	D_1 [m]	D_2	D_3	D_4	
4	3.2	6.8	20.3	23.8	
(c):入力情報パラメータ					
Q_1 [台/周期]	Θ_1	Q_2 [台/周期]	Θ_2	N_{ob} [周期]	
8.5	0.16	46.5	0.20	23	

第 6.1.8 表 騒音レベル分布関数の各パラメータの予測値と

騒音指標に対する予測値と実測値との比較

	$\mu_L(q_1)$	$\sigma_L(q_1)$	$\mu_L(q_2)$	$\sigma_L(q_2)$	L_{50}	$L_{eq}[\text{dB(A)}]$
実測値	-	-	-	-	71.5	76.8
予測値	64.9	8.3	75.8	6.3	71.3	78.2



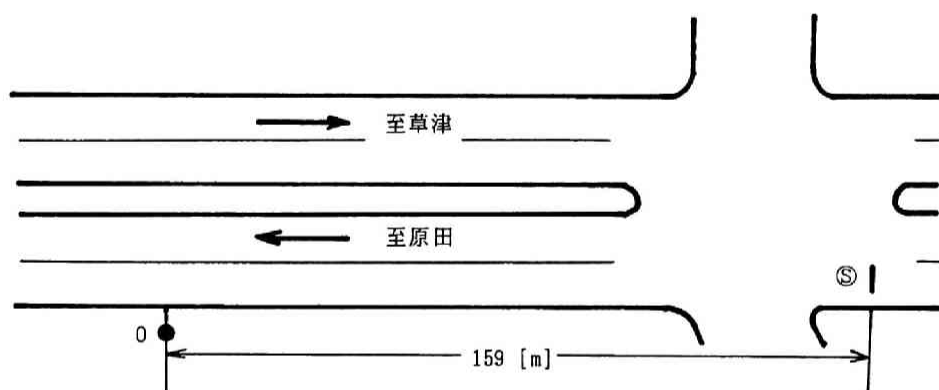
第 6.1.16 図 騒音レベル分布の予測結果と実測値との比較

(a); 度数による比較, (b); 累積分布による比較

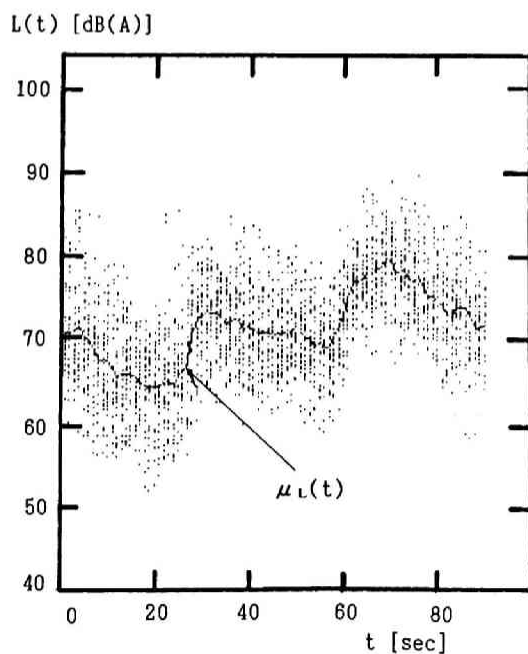
(——— ; 理論的予測曲線, (●); 実測値)

(5) 五月が丘（広島市五月が丘町付近）

県道原田・草津線沿い五月が丘町付近（図 6.1.17 に示す道路状況）で道路騒音を観測した結果を図 6.1.18 の散布図に示す。表 6.1.9 は道路状況パラメータ(a)，観測状況パラメータ(b)及び入力状況パラメータ(c)をまとめたものである。表 6.1.10 及び 図 6.1.19 は予測結果をまとめたものである。



第 6.1.17 図 県道原田・草津線五月が丘町付近の道路状況



第 6.1.18 図 騒音レベル変動の散布図

第 6.1.9 表 実道路での測定値

(a):道路状況パラメータ

V_m [km/h]	u_m [m/sec]	ρ_m [台/m]	T_1 [sec]	T_2 [sec]
50	16.7	0.106	45	45

(b):観測状況パラメータ

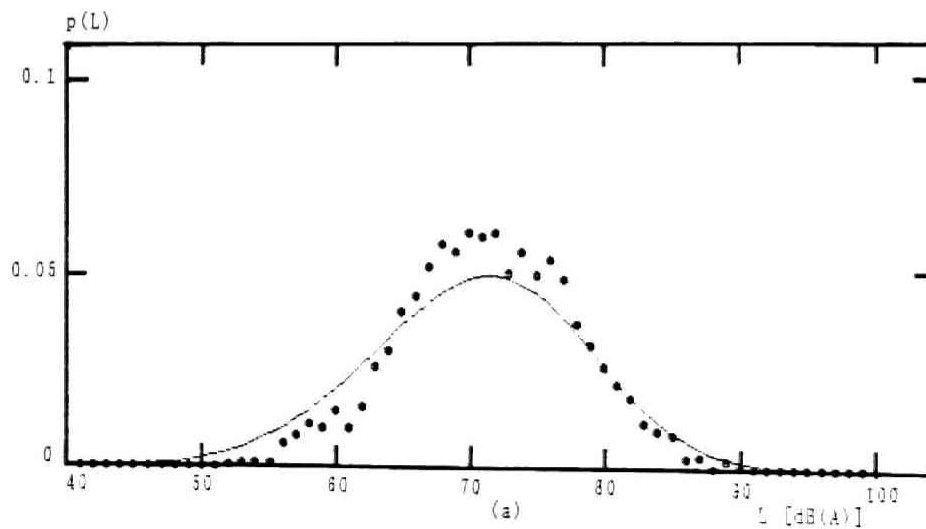
$2 \cdot \ell$ [車線]	D_1 [m]	D_2	D_3	D_4
4	3.1	6.4	12.3	15.6

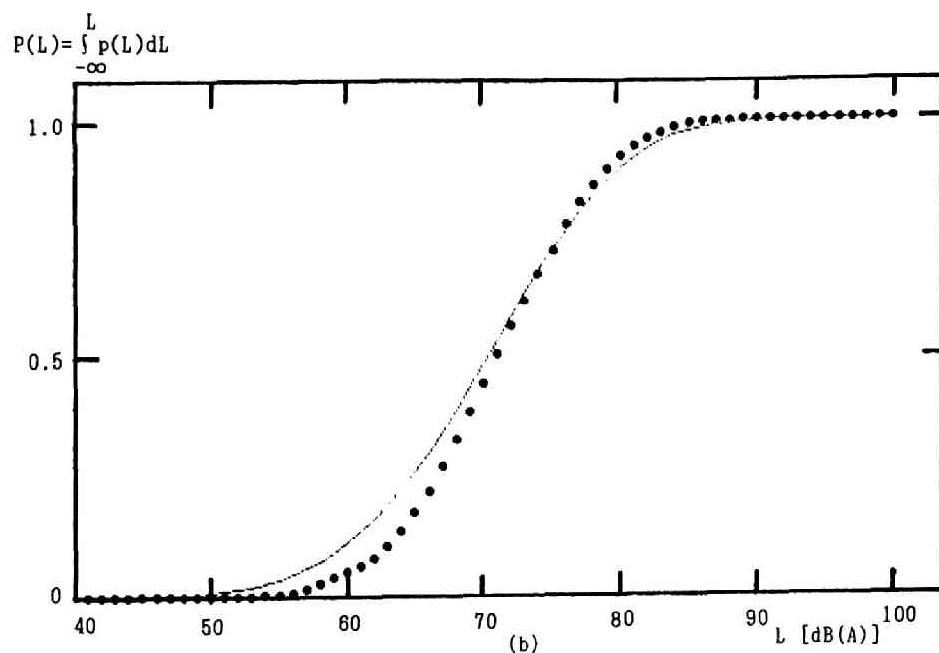
(c):入力情報パラメータ

Q_1 [台/周期]	Θ_1	Q_2 [台/周期]	Θ_2	N_{obs} [周期]
8.1	0.13	18.0	0.26	30

第 6.1.10 表 騒音レベル分布関数の各パラメータの予測値と
騒音指標に対する予測値と実測値との比較

	$\mu_L(q_1)$	$\sigma_L(q_1)$	$\mu_L(q_2)$	$\sigma_L(q_2)$	L_{50}	L_{eq} [dB(A)]
実測値	-	-	-	-	70.9	75.6
予測値	66.4	7.7	73.8	6.5	70.3	76.7





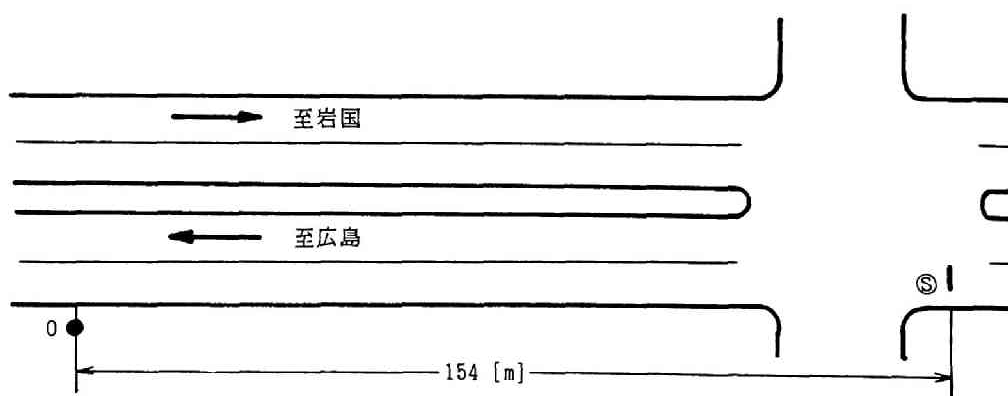
第 6.1.19 図 騒音レベル分布の予測結果と実測値との比較

(a);度数による比較, (b);累積分布による比較

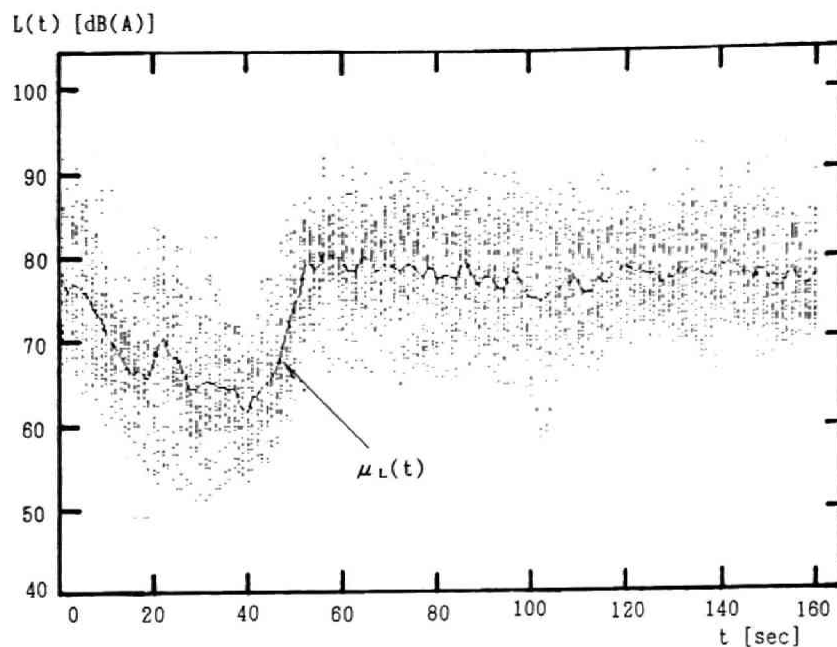
(——— ; 理論的予測曲線, (●);実測値)

(6) 地御前（廿日市市地御前町付近）

西広島バイパス沿い地御前町付近（図 6.1.20 に示す道路状況）で道路騒音を観測した結果を図 6.1.21 の散布図に示す。表 6.1.11 は道路状況パラメータ(a), 観測状況パラメータ(b)及び入力状況パラメータ(c)をまとめたものである。表6.1.12 及び 図 6.1.22 は予測結果をまとめたものである。



第 6.1.20 図 西広島バイパス沿い地御前町付近の道路状況



第 6.1.21 図 騒音レベル変動の散布図

第 6.1.11 表 実道路での測定値

(a):道路状況パラメータ

V_m [km/h]	u_m [m/sec]	ρ_m [台/m]	T_1 [sec]	T_2 [sec]
60	19.4	0.108	37	123

(b):観測状況パラメータ

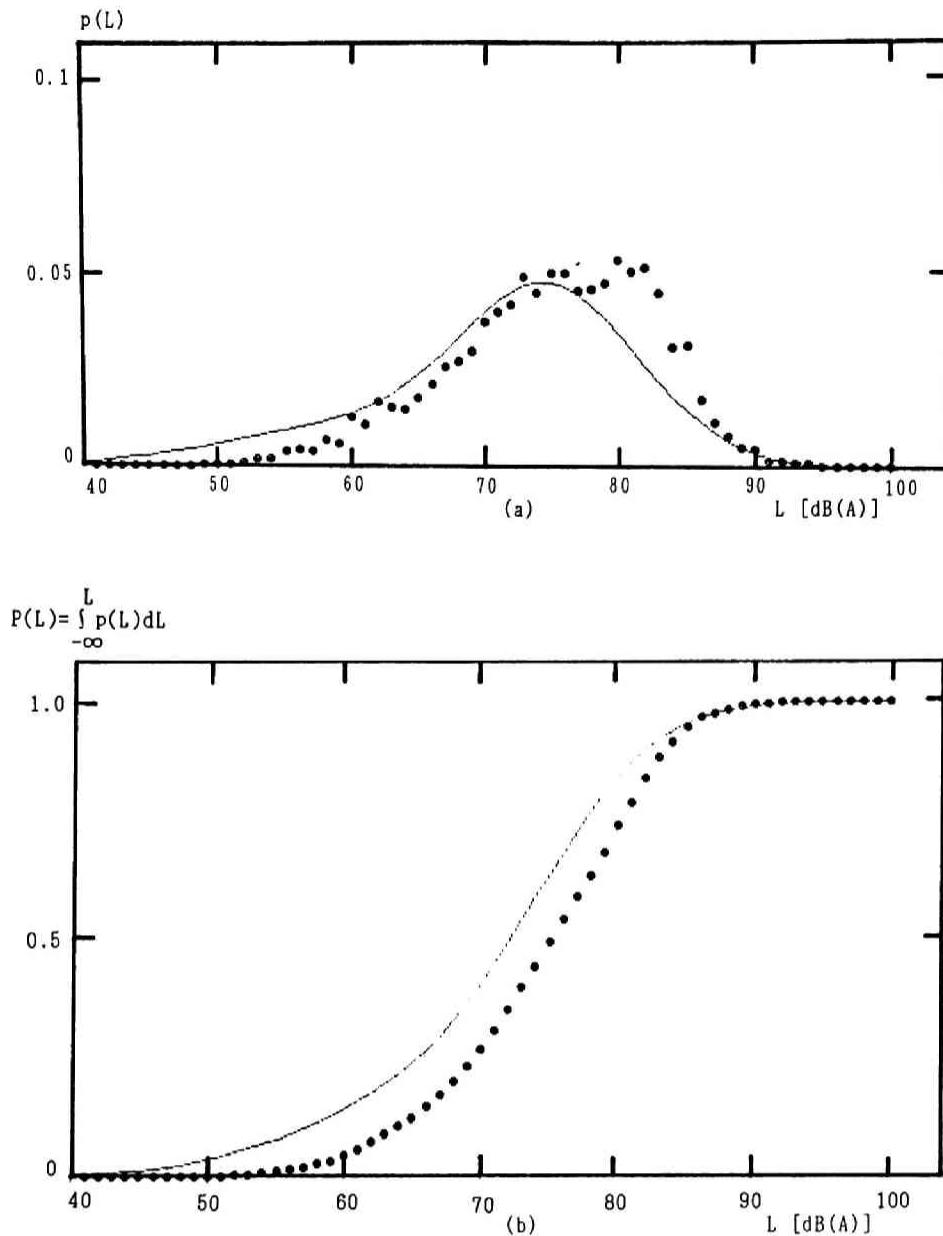
$2 \cdot Q$ [車線]	D_1 [m]	D_2	D_3	D_4
4	3.1	6.4	11.6	14.9

(c):入力情報パラメータ

Q_1 [台/周期]	Θ_1	Q_2 [台/周期]	Θ_2	N_{tot} [周期]
2.3	0.047	48.8	0.24	28

第 6.1.12 表 騒音レベル分布関数の各パラメータの予測値と
騒音指標に対する予測値と実測値との比較

	$\mu_L(q_1)$	$\sigma_L(q_1)$	$\mu_L(q_2)$	$\sigma_L(q_2)$	L_{50}	L_{eq} [dB(A)]
実測値	-	-	-	-	75.1	79.9
予測値	58.9	9.0	74.3	6.7	71.5	78.5



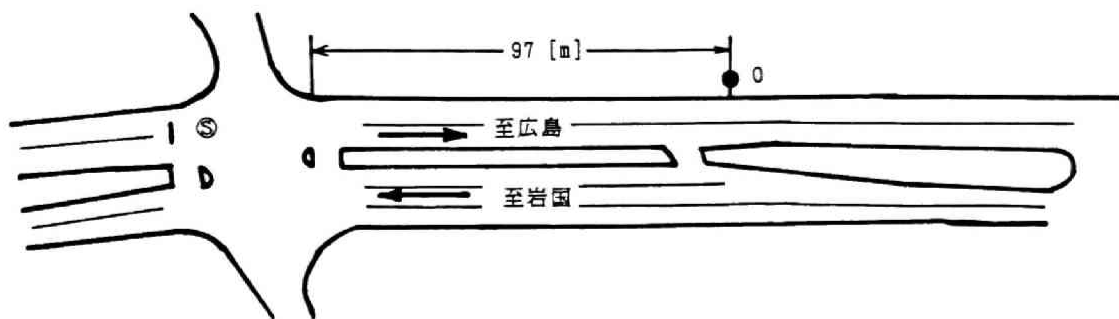
第 6.1.22 図 騒音レベル分布の予測結果と実測値との比較

(a); 度数による比較, (b); 累積分布による比較

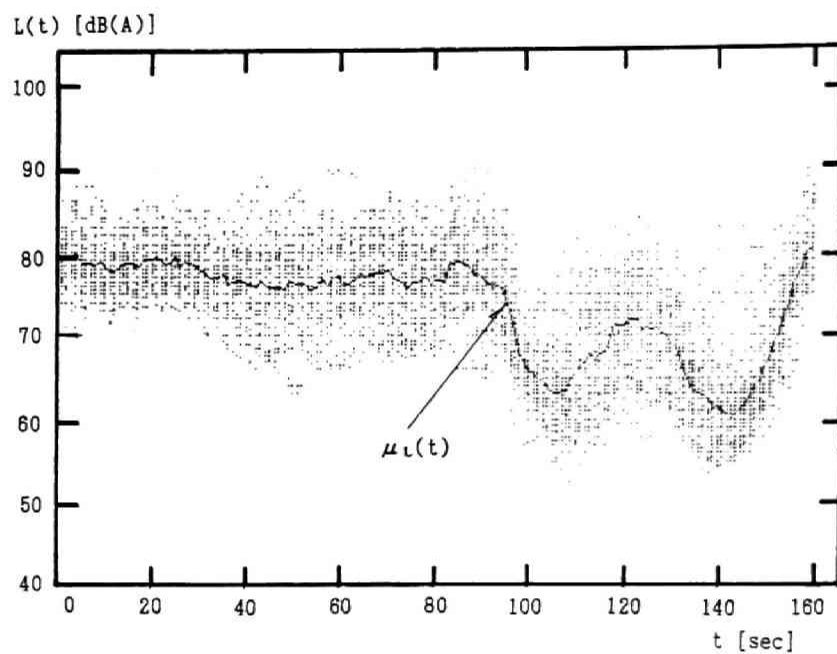
(——— ; 理論的予測曲線, (●); 実測値)

(7) 速谷 (廿日市市速谷町付近)

西広島バイパス沿い速谷町付近 (図 6.1.23 に示す道路状況) で道路騒音を観測した結果を図 6.1.24 の散布図に示す。表 6.1.13 は道路状況パラメータ(a), 観測状況パラメータ(b)及び入力状況パラメータ(c)をまとめたものである。表 6.1.14 及び 図 6.1.25 は予測結果をまとめたものである。



第 6.1.23 図 西広島バイパス沿い速谷町付近の道路状況



第 6.1.24 図 騒音レベル変動の散布図

第 6.1.13 表 実道路での測定値

(a):道路状況パラメータ

V_m [km/h]	u_m [m/sec]	ρ_m [台/m]	T_1 [sec]	T_2 [sec]
60	19.4	0.114	54	106

(b):観測状況パラメータ

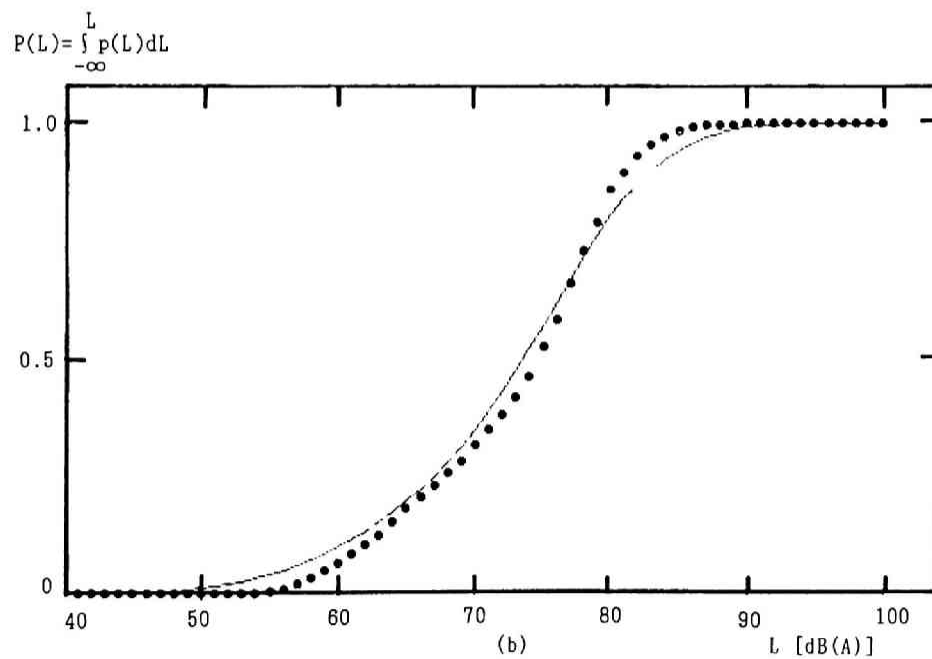
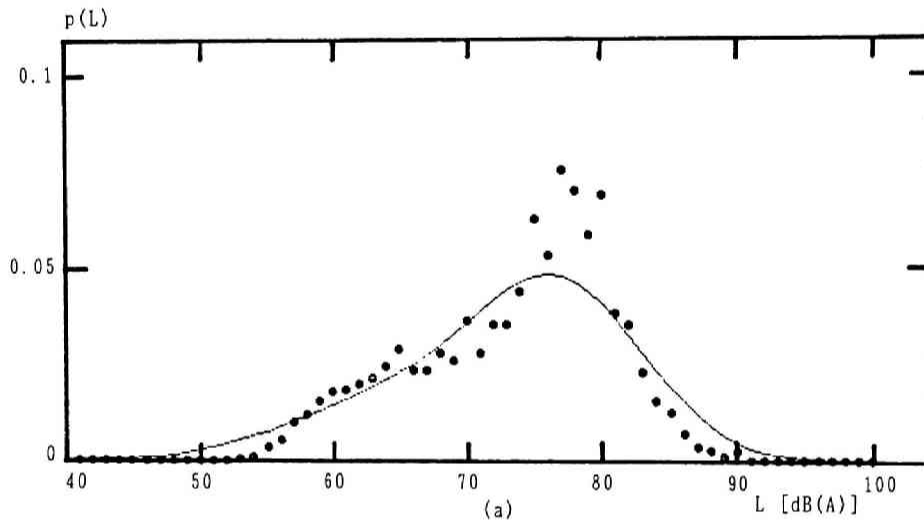
$2 \cdot Q + 1$ [車線]	D_1 [m]	D_2	D_3	D_4	D_5
5	3.3	6.8	15.3	19.8	23.3

(c):入力情報パラメータ

Q_1 [台/周期]	Θ_1	Q_2 [台/周期]	Θ_2	N_{ob} [周期]
4.4	0.089	33.0	0.20	33

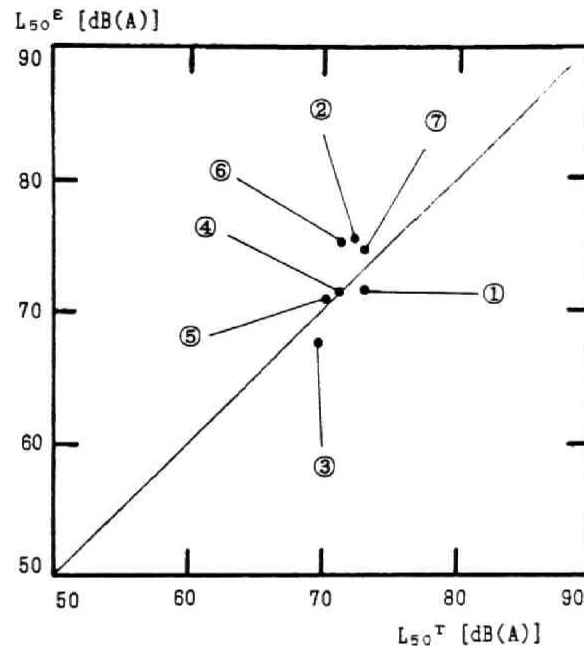
第 6.1.14 表 騒音レベル分布関数の各パラメータの予測値と
騒音指標に対する予測値と実測値との比較

	$\mu_L(q_1)$	$\sigma_L(q_1)$	$\mu_L(q_2)$	$\sigma_L(q_2)$	L_{50}	L_{eq} [dB(A)]
実測値	64.5	8.0	76.5	6.2	74.6	77.8
予測値					73.2	79.4

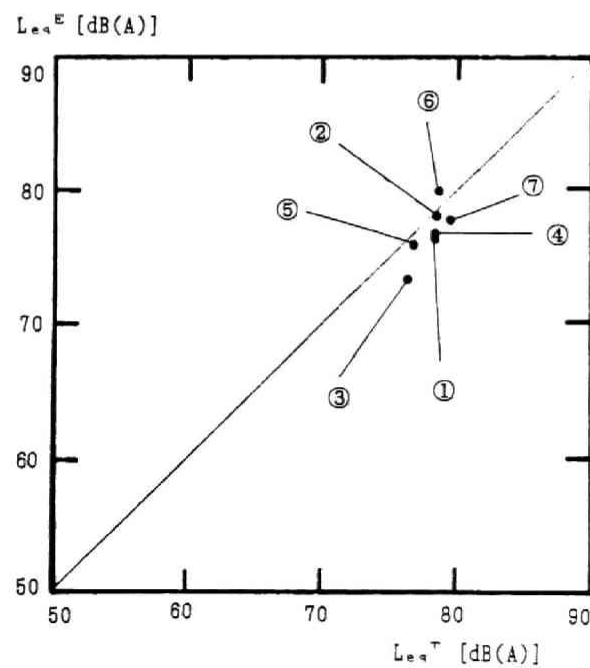


第 6.1.25 図 騒音レベル分布の予測結果と実測値との比較
(a); 度数による比較, (b); 累積分布による比較
(— ; 理論的予測曲線, (●); 実測値)

図 6.1.26 及び図 6.1.27 は特に予測結果 (1) から (7) の内、 L_{50} 、 L_{eq} に関するものをまとめて示したものである。



第 6.1.26 図 騒音指標 L_{50} の予測結果 (L_{50}^T) と実測値 (L_{50}^E) との比較
(①;仁保, ②;東霞, ③;千足, ④;宮内, ⑤;五月が丘, ⑥;地御前, ⑦;速谷)



第 6.1.27 図 騒音指標 L_{eq} の予測結果 (L_{eq}^T) と実測値 (L_{eq}^E) との比較
(①;仁保, ②;東霞, ③;千足, ④;宮内, ⑤;五月が丘, ⑥;地御前, ⑦;速谷)

6.1.4-3 実道路への適用結果に対する検討

§ 6.1.2 で設定したモデルを実道路 7 カ所に適用した結果を § 6.1.4-2 に示した。騒音レベル分布の予測結果に関して、全体として多少誤差を生じた結果も見られるが、騒音指標 L_{eq} , L_{eq} の予測誤差で見れば、ほぼ 3 dB(A) 以内におさまっている。従って、§ 6.1.4-2 の 7 例のみから判断すれば、本節で提案した簡易予測モデルはかなり有効であったと言える。

しかしながら、モデルを簡易化するために § 6.1.2 ではいくつかかなり思い切った設定・仮定をしている。どの設定・仮定によって、どの程度定量的に誤差が生じるものか議論しにくい面もあるが、これらの設定条件と予測誤差との関係を以下に考察する。

(1) C-(1), (2) (片側車線のみ考慮する (§ 6.1.2 参照)) に対する検討

騒音観測点側車線の交通量が多く、この発生騒音が観測点へ支配的に寄与し、暗騒音は十分に無視し得る状況及び近接音場で観測する (具体的には、 $D_1/D_i < 1$ ($i = Q+1, \dots$) ((5.1.5) 式参照) が成立する) 場合には大略成立する仮定と考えられる。

しかしながら、適用例 (2) 東霞及び (6) 地御前に見られるように、 Q_1 (副道路からの進入交通量) が少ない道路状況では明かにこの仮定による誤差が生じる。即ち理論的には Q_1 が小さいために、低いレベル (40 数 [dB(A)]) までの発生騒音の可能性を予測する。一方、通常道路端での暗騒音は 50 [dB(A)] 程度はあると考えられる。このような道路状況では、例えば対向車線からの騒音も考慮するなど、C-(1), (2) の設定を検討する必要があるだろう。

D_1/D_i の因子による誤差は、全ての測定箇所では $D_1=3$ [m] 程度であったため、今回の実験結果からは不明であり、今後検討していく必要がある。

(2) グリーンシールズモデル及び $u_m = (V_m + 10)/3.6$) に対する検討

騒音発生源である車両の走行状態を大略的に把握することは、騒音予測する上で重要であることは既に述べた。本簡易モデルでは、グリーンシールズがその重要な役割を果たしている (§ 6.1.2 A. (6) 参照)。このモデルの特色は、平均流量 q 、及び平均車両速度 u をパラメータ u_m , ρ_m を用いて平均車両密度 ρ のみの一次関数により簡易表現している点である。具体的運用に当たっては、 ρ_m は (6.1.18) 式より、 u_m は大略的に (6.1.19) 式より算定した。

しかしながら、実道路状況では V_m から u_m を算定する方式は勿論、 ρ のみの関数とした仮定が成立しない場合も生ずる。例えば、信号機が数多く連なっている幹線道路状況で

の信号機の相対的点滅時刻による、いわゆる導通の良くない道路状況である。このような導通の良くない道路状況では、車速は車両密度 ρ のみでは決まらず、ドライバーは前方の信号機や道路状況も考慮して車速を決定することがしばしば観察される。このような道路状況の顕著な例が(1)仁保及び(3)千足であった。推定した u は実測値より約10[km/h]大であったために、予測値は実測値を多少上回って算定されたものと考えられる。このような道路状況が予め予測される場合は、(6.1.8)式による u をより小さく評価するために、本質的改善ではないが u_m を小さ目に設定するのも一法である。

(3) パワーレベルに対する検討(1)

§6.2.1のB.で設定した車両の出力パワーレベルに関するモデル(1),(2)は平坦道路状況を仮定したものであった。実道路では、多少傾斜のある(登り坂・下り坂)道路状況での騒音問題も生じよう。このような場合、文献8)に示すようなパワーレベルの修正を施す必要も生じよう。本実験的検討では、(6)地御前での道路状況がこのような緩い登り坂での騒音観測であった。予測結果が実測値を下回ったのは、これが一因であったと考えられる。

(4) パワーレベルに対する検討(2)

本予測モデルで用いたパワーレベルに関する設定では、車種及び車速度のみ考慮し、加速度あるいは使用ギヤの要因^{9) 10)}を考慮していない。これは、(1)出来る限り少ないパラメータで設定することが望ましいこと、及び車種ごとの速度を用いても大略のパワーレベルを設定可能である。(2)(6.1.1)式といった時間率による重み付き分布表現を用いた場合、速度の変動量としての加速度等の影響が顕著に現れるのは発進・加速時であり、この現象が継続している時間は信号一周期の時間に比してそれ程大きな時間率とはなるまい。(3)信号機からある程度離れば、加速度等による影響はかなり減少していると考えられる理由からである。ちなみに、本実験では、70~200[m]程度の地点で騒音を観測している。従って、信号機側に近づき、どの程度の距離まで本予測手法が適用可能なのか、あるいはどの程度の距離から加速度等の要因による誤差がどの程度生ずるのかに関する問題は今後の課題である。

以上が簡易予測モデルに対する実道路7カ所に適用しての主な検討結果である。今後多くの実道路状況に適用して、本モデルの適用限界・問題点を明かにしていく必要がある一方、このような問題点を予測モデルにフィードバックして、例えば入力情報として(Q_f ,

θ_j ($j=1, 2$) の他に暗騒音等を考慮した、より広範囲に適用可能なモデルとなるよう改善していく必要がある。

6.1.5 結言

第5章では、信号機周辺での発生騒音の予測が原理的に可能であることを示した。本節では前章の基本的考察結果を踏まえた上で、騒音予測方式として簡易で適用容易なモデルを構成することに考察の焦点を置いた。具体的には、

(1) 騒音発生源の状態を予め把握しておく必要から、交通変数の推定問題を、はじめから平均流量の変動パターンを、具体的には信号機が赤・青を点灯するときの二つの平均流量変動パターンを仮定することにより簡易化した。

(2) 騒音レベルの平均・分散の変動パターンを解析的に予測する問題を、(1) のモデル化に伴い定常的交通流での解析を利用することにより解決した。

次いでこの簡易予測モデルを実道路7カ所に適用して、有効性を検証した。特に、簡易化するために設定した仮定と予測誤差に対する考察を行い、適用する上でのいくつかの留意点を明らかにした。

一般に、システムの複雑さが増加しある限度を越えると、システムの挙動について“正確でかつ意義ある”記述は不可能になる（限度というのはこれを越すと正確ということと意義のあるという要請が相容れないものになる複雑さのレベルのことである）ことをファジィ理論の提唱者であるザデーは“不適合性の原理”¹¹⁾として挙げている。即ち、正確さをきそうとすると、システムモデルの変数とパラメータの数が膨大となりシステムの全体像が見えず、使いものにならないモデルになる。一方、見通しのよいモデルというのは、量的関係を犠牲にした定性的なものになってしまうであろう¹²⁾。本節での考察は信号機周辺での騒音予測問題を採り上げての、まさにこのような様相の中での一つの提案である。今後上記原理に基づき、具体的に最適なモデルとはどのようなモデルであるか、予測問題の設定の仕方や予測出力の評価の仕方によって様々な最適モデルが考えられようが、これらを明確にした上で、本節で提案したモデルをより良いモデルに修正していく必要がある。

この節の引用文献

- 1) 加藤裕一, 山口静馬, 高木興一; “信号機周辺における道路騒音の簡易予測手法と実験的検討,” 日本音響学会講演論文集, 725-726 (1992.10).
加藤裕一, 山口静馬, 高木興一; “信号機周辺における道路騒音の簡易予測手法と実験的検討,” 日本音響学会投稿中
- 2) R.Harberman; Mathematical Model:Traffic Flow (Prentice Hall, New York, 1977)
- 中井 久訳, 交通流の数学モデル (現代数学社, 京都, 1981) .
- 3) 藤田大二; 交通現象と交通容量 (技術書院, 東京, 1987) .
- 4) 佐々木實, 山下充康; “道路特殊箇所の騒音の予測に関する検討 - インターチェンジ部周辺 - ,” 日本音響学会誌, 40(9), 638-643 (1984).
- 5) 太田光雄, 山口静馬, 広光清次郎; “多車線・多車種・任意長道路の交通騒音予測問題に関する統一的研究 (理論とシミュレーション実験), ” 日本音響学会誌, 32(7), 403-412 (1976).
- 6) 山口静馬, 加藤裕一; “道路騒音の L_{eq} から L_{90} への変換式に関する一考察,” 日本音響学会講演論文集, 529-530 (1990.9).
- 7) 日本規格協会編;統計数値表, 解説の部, p.6 (1977).
- 8) 金安公造, 金泉 昭; 交通公害, (技術書院, 東京, 1976) p.70.
- 9) 木村彰良, 坂上丈寿; “道路騒音のシミュレーションについて,” 日本音響学会誌, 31(7), 463-467 (1975).
- 10) B.Fave; “Noise at the Approach to Traffic Lights:Results of Simulation Programme,” The Journal of Sound and Vibration 58, 563-578 (1978).
- 11) L.A.Zadeh; “Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes,” IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-3, No.1, 28-44 (1973).
- 12) 菅野道夫; ファジィ制御, (日刊工業新聞社, 東京, 1988) p.69.

総 括

道路騒音の予測手法に関してこれまで数多くの研究が報告されている。中でも高速道路、自動車専用道路等での定常な交通流状態では標準的モデルとして、等間隔モデルや指数分布モデルが騒音評価・対策問題によく用いられている。

一方、市街地での交通流モデルは特に信号機の影響を強く受けており、上記定常交通流に基づく予測手法を適用することは困難であること、非定常現象を解析的に定量化することの困難さから、従来いくつかの経験式による予測や計算機シミュレーションによる予測といった報告がなされている程度であり、信号機の影響を受けた非定常な現象の基礎的な考察に基づく発生騒音の予測法に関する報告は見あたらないようである。信号機周辺での道路騒音は信号機の点滅により脈動のある性状を示し、定常な交通流での騒音に比較して、より“うるさく”感じるといった報告もあり、騒音の心理的評価の側面からも重要である。

本論文では、このような信号機の影響を受けた騒音レベル変動形態は、信号機の周期的点滅により生ずる繰返し現象であるとの知見に基づき、信号機周辺で長時間観測される物理的な騒音レベル変動の分布予測手法を考察した。このレベル分布関数より L_{60} 、 L_{eq} といった重要な騒音指標が得られる。以下に本研究で行った考察と主要な成果を述べる。

第2章では、考究の第一歩として信号機の点滅により影響を受けた交通流と、その発生騒音に関する実測調査を3カ所で実施した。この調査より、考察対象は共通に信号機が周期的に点滅することによって引き起こされる繰返し現象であるとの知見を得た。特に信号機の影響が結果的に現れていると思われる、騒音レベル変動に対して信号一周期内的での騒音レベルの散布図を作成し次のことを明かにした。

(1) 騒音レベルの平均的変動パターンは、各測定点ごとにその周辺での信号機に制御された信号一周期内的での車両の流れの様子を窺わせる固有な変動パターンを示す。

(2) 騒音レベルの散布状況は、信号一周期内の任意の時点で平均値に対して、ほぼ上下対称に散布しており、その散布幅も各時点でそれほど大差は見られない。

このような指摘は従来の研究成果には含まれておらず、新たな一発見であることには留意すべきである。

第3章では、第2章の実測調査から得られた知見に基づき騒音レベルの周期的変動現象に着目した、長時間での騒音レベル分布関数表現を理論的に導出した。

具体的には、3.1節では騒音レベルの変動は信号周期内でその平均値が $\mu_L(t)$ といった形で時間的に変動し、分散が一定のガウス分布に従うモデルにより、目的の分布関数を具体化した（表現法1）。次いで実測データに適用して理論的考察の正当性を確認するとともに、次なることを明かにした。

(1) 考察対象を定常的に扱うのであれば、推定レベル分布にかなりの誤差が生ずる。

(2) 平均レベルの周期的変動性を考慮することによってこの誤差を改善できる。

更に、実用的有効性を獲得するために $\mu_L(t)$ を近似的に推定して、レベル分布を推定することを実験的に考察し、その有効性を検証した。このような近似化手法は、対象の変動パターンをどの程度推定できれば、目的の分布関数が推定可能となるかといった観点から重要である。

3.2節では3.1節で考察した分布関数表現を高次レベル統計量の周期的変動まで考慮した、一般的分布関数表現を考察した（表現法2）。特に2次統計量（分散）までの周期的変動を考慮したモデルを実測データに適用して、展開型のレベル分布関数表現の収束性を改善できることを示した。

第4章では、同じく第2章の実測調査から得られたデータのうち、特に騒音発生源である交通流データに根ざして、目的の騒音レベル分布関数を考察した。

4.1節では騒音観測点付近での平均走行車両台数の変動パターン（ $\mu_N(t)$ ）は、平均的騒音レベルの変動パターン $\mu_L(t)$ と相似的であることを実測調査データを用いて示し、交通流を代表する変量のなかでも $\mu_N(t)$ を把握することが重要であることを明かにした。

次いで定常交通流でのモデルの解析結果に着目した、平均車両台数と騒音の音の強さに関する統計量との回帰モデルを用いて騒音レベル変動の平均及び標準偏差の変動パターン（ $\mu_L(t)$ 及び $\sigma_L(t)$ ）が推定可能となることを示した。従って、 $\mu_N(t)$ をなんらかの情報から推定できれば、上記回帰モデルに基づき $\mu_L(t)$ 及び $\sigma_L(t)$ を一旦推定した後、第3章で考察した騒音レベル分布関数表現1あるいは2に帰着することにより、レベル分布関数の推定が可能となることを示した。一例として、 $\mu_N(t)$ を信号一周期のデータから推定し、レベル分布関数の推定が可能となることを示して、本手法の有効性を検証した。

4.2節では特に第2章で実測調査した市街地交差点内での騒音レベル分布推定問題を、シミュレーション実験を中心に考察した。まず、交差点内での交通流を整理して、簡易な

シミュレーションモデルに基づき複雑な伝搬環境を同定した。次いで信号一周期での流量が与えられるなら、これに対応する $\mu_N(t)$ がほぼ定まりこの変動パターンを入力情報（他に平均車両速度、車種混入率が必要）として、上記シミュレーションモデルにより騒音レベル分布推定ができることを実験的に示した。本考察においても $\mu_N(t)$ が中心的役割を果たしていることには留意すべきである。

ここまでの考察は、第2章での実測調査から得られた知見と実測データに基づき、着目すべき変量を明かにして、騒音レベル分布関数を推定することを考察してきた。第5章、第6章では、これらの変量を入力情報より推定し、騒音レベル分布関数を予測することを考察した。

第5章では、単位時間当たりでの交通量及び大型車混入率を入力情報とすれば、信号周期内での交通流の状態及びその発生騒音の $\mu_L(t)$ 及び $\sigma_L(t)$ の推定が理論的に可能となり、従って、騒音レベル分布の予測が原理的に可能となることを示した。

具体的には5.1節では、流体力学的交通流理論に基づく新たな解析アルゴリズムを設定して、信号周期内での交通変数（平均車両密度 $\rho(t)$ 、平均車両速度 $u(t)$ 、平均流量 $q(t)$ ）を単位時間当たりでの交通量を入力として推定できることを示した。次いで、4.1節で実験的に得られた $\mu_N(t)$ に代わり、理論的に推定可能な $q(t)$ を用いて4.1節での考察と同様に騒音レベル分布関数が推定できることを実験的に示した。特に、信号機の点滅により車両が停止・発進を繰り返す状況では単に存在車両台数の変動パターンを用いたのでは誤差が生ずることを明かにした。

5.2節では、ここまでの考察で問題点として残されていた次なる2つの問題：（1）第3章で考察したレベル分布表現が無限級数展開表現であること、（2）実測データを用いて、騒音の音の強さに関する統計量と平均走行台数（ $\mu_N(t)$ ）あるいは平均流量（ $q(t)$ ）との回帰的關係を設定していたこと、を5.1節で推定した $q(t)$ の時間率に基づく分布表現及び、4.2節での考察と同様の計算機シミュレーション実験から発生したデータを用いて解決した。特に、主道路側の信号機が赤及び青を点灯する状態での、それぞれの流量の平均値による近似化パターンを用いて騒音レベル分布が予測可能となることを実験的に示した。

第6章では、原理的に騒音レベル分布予測が可能となった第5章での考察結果を踏まえて、簡易で適用容易な実用的騒音予測方式を提案した。即ち信号一周期での主道路、副道

路のそれぞれ交通量及び大型車混入率のみを入力情報として、シミュレーション実験を行うことなく目的の騒音レベル分布を予測するモデルへと改善した。具体的には、

- (1) 第5章で考察した近似化パターンによる予測結果が良好であったことに着目して、平均流量の変動パターンを、信号機が赤・青を点灯するときの流量の平均値を用いて、変動パターンを初めから仮定することにより、交通変数の推定問題を簡易化した。
- (2) (1)のモデル化に伴い、騒音レベルの平均・分散の変動パターンの推定問題を、第5章で行った計算機シミュレーションによらず、定常交通流での解析結果を利用することにより解決した。

更に、このモデルを実道路7カ所に適用して有効性を検証するとともに、適用する上での留意点を明かにした。

謝 辞

本研究の直接的な機会を与えて下さると同時に、本論文の達成にあたって暖かい御援助と御配慮を賜った 京都大学工学部 高木興一 教授に心から感謝致します。

本研究を遂行するにあたり、直接的な御指導と終始懇切な御鞭撻を頂いた 山口大学工学部 山口静馬 教授に深く感謝致します。

本研究の実験にあたって多大の御協力を頂いた 金尾政明（現、シャープ（株））、北東政治（現、国際電気（株））、佐藤雅則（現、中国電力（株））、藤木勝成（現、ミノルタカメラ（株））、寺下 聡（現、アルプス電気（株））、藤本孝介（現、三菱ビルテクノサービス（株））、今岡稔和（現、中国電気工事（株））、沖永昌也（現、キャノン販売（株））、奥川雅之（現、松下電器（株））、加川 徹（現、中国電力（株））、広永健一（現、横河電機（株））、光宗昌夫（現、日本電気インフォメーションテクノロジー（株））、中谷英之（現、東芝（株））、西本潤司（現、日本電装（株））、藤田秀明（現、三重大学院生）、林 訓久（現、住友電設（株））、藤田賢典（現、国際電電（株））、部谷 学（現、大阪大学学部生） の諸氏に心より御礼申し上げます。

関連分野における発表論文

- (1) Y.Kato, S.Yamaguchi, M.Ohta; "A Statistical Estimation Method of Noise Level Probability Distribution of Arbitrary Type Based on the Observed L_{eq} Data," Acoustics Australia 13(2), 69-71 (1985).
- (2) 山口静馬, 加藤裕一, 太田光雄; "中央値の実測標本データに基づく騒音レベル分布の推定," 日本音響学会誌, 41(10), 700-702 (1985).
- (3) 加藤裕一, 山口静馬; "信号機による非定常道路交通騒音の一予測方法," 日本音響学会誌, 44(7), 510-514 (1988).
- (4) 山口静馬, 加藤裕一; " L_{eq} と L_{eq} の関係式設立に関する基礎的一考察," 日本音響学会誌, 44(7), 515-518 (1988).
- (5) S.Yamaguchi, Y.Kato, K.Oimatsu; "A Statistical Consideration on the Accuracy of Equivalent Sound Level Measurement Based on Sampling Methods," Acoustics Letters, 11(8), 144-147 (1988).
- (6) 山口静馬, 加藤裕一; "車両台数計測に基づく車頭間隔分布の推定 - アーラン分布モデルの場合 -, " 日本音響学会誌, 44(11), 861-864 (1988).
- (7) S.Yamaguchi, Y.Kato, K.Oimatsu; "The Statistical Evaluation of a Specific Sound Source in a Background Noise Environment, based on the Concept of Momentary Signal-to-Noise Ratio," Acoustics Letters, 11(11), 203-211 (1988).
- (8) Y.Kato, S.Yamaguchi; "A Simple Calculation Algorithm for Analyzing the Traffic Flow in the Road with Many Intersections," Proceedings of the 28th SICE Annual Conference, Vol. II, 1013-1016 (1989).

- (9) S.Yamaguchi, Y.Kato; "A Prediction Method of Non-stationary Road Traffic Noise based on Fluctuation Patterns of an Average Number of Flowing Vehicles, " Applied Acoustics, 27(2), 103-118 (1989).
- (10) Y.Kato, S.Yamaguchi; "A Practical Method for Estimating the Headway Distribution based on the Observed Data of the Number of Flowing Vehicles — Gamma Distribution Model—, " The Journal of the Acoustical Society of Japan, 10(6), 357-361 (1989).
- (11) S.Yamaguchi, Y.Kato; "A Practical Method of Predicting Noise Produced by Road Traffic Controlled by Traffic Signals, " The Journal of the Acoustical Society of America, 86(6), 2206-2214 (1989).
- (12) 山口静馬, 倉本和興, 加藤裕一; "任意不規則騒音に対する等価騒音レベル分布と等価音圧レベル分布との統計的関連性, " 日本音響学会誌, 46(1), 40-44 (1990).
- (13) 加藤裕一, 山口静馬; "交通流状態変数の推定法と騒音レベル分布予測への応用, " 日本音響学会誌, 46(6), 458-467 (1990).
- (14) Y.Kato, S.Yamaguchi; "A Prediction Method for Probability Distribution of Road Traffic Noise at an Intersection, " Acoustics Australia, 18(2), 45-50 (1990).
- (15) S.Yamaguchi, Y.Kato; "A Statistical Study for Determining the Minimum Sample Size for L_{eq} Estimation of Periodic Nonstationary Random Noise, " Applied Acoustics, 32(1), 35-48 (1991).
- (16) S.Yamaguchi, K.Oimatsu, K.Kuramoto, Y.Kato; "A Statistical Method of Evaluating the Sound Insulation Effect of a Single Wall, " Acustica 73, 217-220 (1991).

- (17) 加藤裕一, 山口静馬; “ファジィ理論に基づく変動騒音の心理評価法,” 日本音響学会誌, 47(5) 305-309 (1991).
- (18) 山口静馬, 加藤裕一; “交通量時間率に基づく周期的非定常道路騒音の分布予測,” 日本音響学会誌 47(10) 723-728 (1991).
- (19) Y.Kato, S.Yamaguchi; “A Systematical Study for Psychological Impression Caused by Fluctuating Random Noise based on Fuzzy Set Theory,” The Journal of the Acoustical Society of America, 91(5), 2748-2755 (1992)
- (20) Y.Kato, S.Yamaguchi; “An Evaluation Method for Annoyance to Fluctuating Random Noise by Use of Fuzzy Set Theory,” Proceedings of the 14th International Congress on Acoustics, H4-6 (1992).
- (21) 山口静馬, 加藤裕一, 老松建成; “騒音のパワースペクトル情報に基づく心理的応答の一予測手法,” 日本音響学会誌 49(1) 2-9 (1993).

